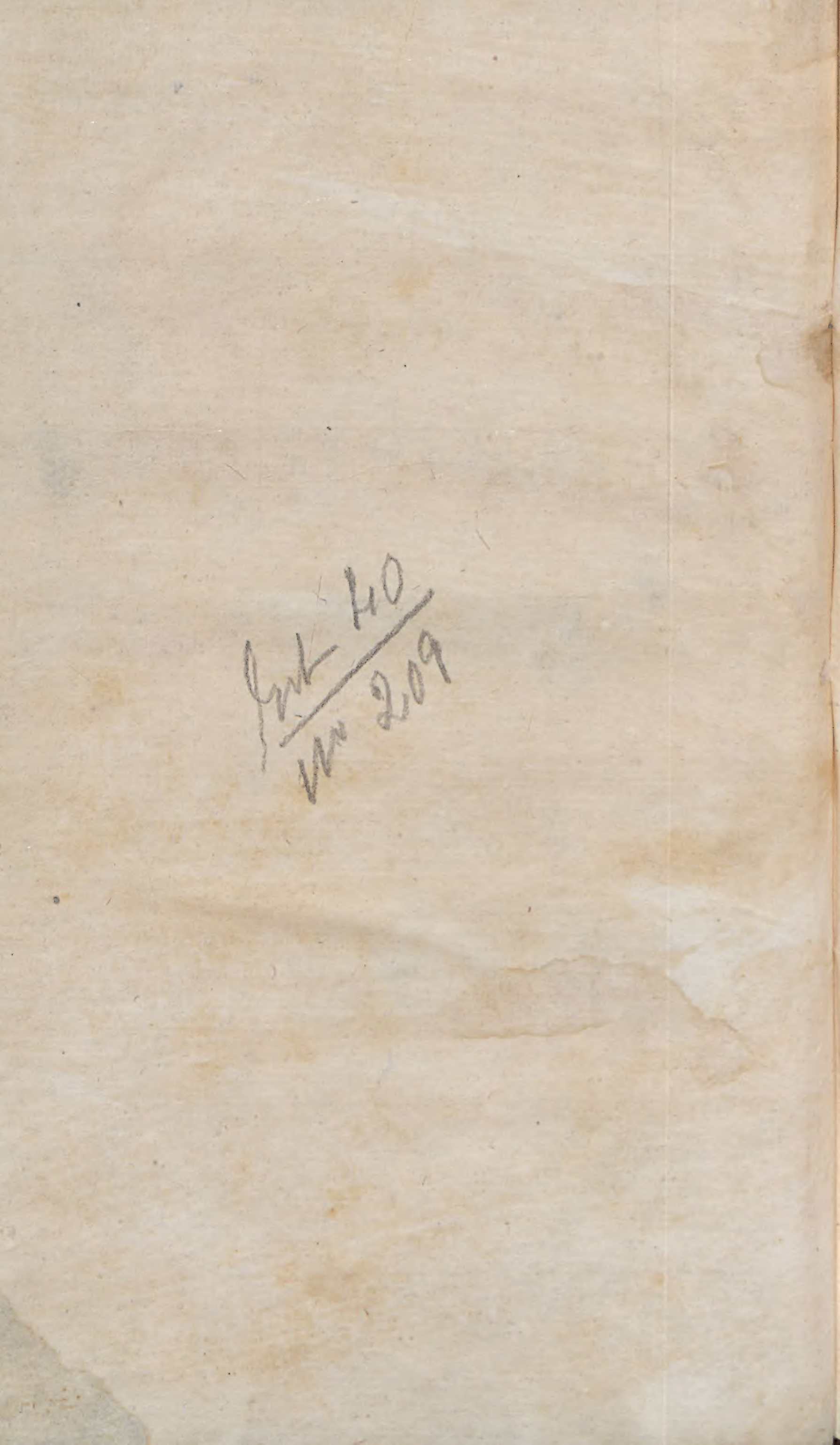








TRATADO DE FÍSICA
ESPERIMENTAL.

TRATADO DE FÍSICA
ESPERIMENTAL

POR J. B. BIOT.

DESTINADO POR DECRETO DE LA COMISION DE INSTRUCCION PÚBLICA DE 22 DE FEBRERO DE 1817 PARA LA ENSEÑANZA EN TODAS LAS CÁTEDRAS DE FÍSICA DEL REINO DE FRANCIA:

TRADUCIDO

POR D. FRANCISCO GRIMAUD DE VELAUNDE,
Individuo de varias Corporaciones científicas y literarias peninsulares y estrangeras, y Discípulo de física de MM. Gay-Lussac, Biot y Tremery, Profesores en la Facultad de Ciencias, y en el Ateneo de Paris.

TOMO CUARTO.

MADRID.

IMPRENTA DE REPULLÉS, *plazuela del Angel.*

AÑO 1826.

TRATADO ELEMENTAL

DE FÍSICA.

CAPITULO QUINTO.

De las reflexiones, refracciones y colores de los cuerpos delgados trasparentes.

En todos los fenómenos que hemos considerado hasta aqui, el grueso de los cuerpos que obraban sobre la luz para refractarla, dispersarla ó reflejarla, era como infinito en comparacion de la distancia á que esta accion se estendia de un modo sensible. La refraccion de los rayos, por ejemplo, no se hubiera formado bajo un ángulo mas considerable usando de prismas mas gruesos, ni la reflexion producida sobre las superficies de los espejos metálicos ó de vidrio hubiera sido distinta aunque hubiésemos aumentado su grueso. Pero cuando estos mismos cuerpos se hallan reducidos á láminas sumamente delgadas, entonces varían los resultados, reflejan menos luz en su primera superficie, y en la segunda reflejan ó trasmiten con preferencia ciertos colores, segun su naturaleza química y su grado de tenuidad. Este fenómeno, importantísimo por sus consecuencias, ha sido analizado por Newton por medio de las esperiencias que vamos á esplicar.

Cuando se toman dos prismas de vidrio pulimentado, y se colocan uno sobre otro sin comprimirlos, la capita de aire que naturalmente se halla adherida á su superficie tiene comunmente todo el grueso necesario para que su accion sobre la luz sea completa, pues los fenómenos de reflexion y re-

fraccion á través de los dos prismas y de esta capita de aire siguen exactamente las leyes que hemos establecido en los capítulos anteriores; y si se separan mas las dos superficies inmediatas, el grueso mayor de la capa de aire no altera en nada estos resultados. Pero si se frotan los dos prismas uno contra otro, comprimiéndolos fuertemente para escluir parte de este aire que los separa, no se tarda en conocer que hay entre ellos cierta adherencia que ordinariamente es mas considerable en unas partes que en otras, ya porque sus superficies son casi siempre un poco curvas, ya porque siempre se les hace doblar algo comprimiéndolos con fuerza. De este modo se obtiene una capa de aire mas delgada que la anterior, y cuyo grueso va aumentando desde el punto en que las superficies inmediatas estan mas próximas al contacto hasta los puntos en que se hallan mas separadas. En este caso, si se presentan los prismas á una gran luz, volviéndolos de modo que el ojo pueda recibir la luz que se refleja parcialmente en la lámina de aire que los separa, se perciben en ella un número mayor ó menor de anillos coloridos, que cuando se han comprimido suficientemente los prismas, rodean una mancha negra correspondiente al punto de contacto.

Para observar bien el órden de estos anillos y la sucesion de sus colores es preciso emplear prismas de un ángulo pequeño, á fin de que la luz que los atraviesa para formar los anillos no sufra una dispersion sensible antes de llegar á la capa de aire. Es conveniente colocar estos prismas sobre un cuerpo negro, á fin de que ninguna luz estraña, emanada de los objetos esteriores, venga por trasmision á mezclarse con la de los anillos que se quieren estudiar. En seguida es menester colocarse delante de una ventana abierta, volviendo la arista B del prisma superior, fig. 1, hácia la parte de adentro, y colocando el ojo sobre este prisma, de modo que solo reciba la luz refleja sobre la superficie inclina-

da BC, y deje pasar la que se refleja sobre la superficie superior AB. La posicion mas ventajosa es aquella en que los rayos reflejos en la lámina de aire entre los dos prismas atraviesan perpendicularmente la superficie AB, mientras que la luz incidente RI, que se refleja parcialmente en esta misma superficie, se dirige hácia R′, sin llegar al ojo del observador, que se supone bastante elevado sobre el plano AB, para no recibir ninguno de los rayos que se reflejan oblicuamente. Si ademas de esto el prisma inferior se halla colocado sobre un cuerpo negro, como hemos recomendado antes, los anillos reflejarán los colores mas vivos, y la mancha central, absolutamente oscura, parecerá un agujero hecho en medio de ellos; pero aun se distinguirán mas fácilmente observándolos, como puede hacerse, con una lente sencilla ó un anteojo de un foco muy corto.

Los anillos formados de este modo no son producidos por la luz que se refleja en la superficie superior de los prismas, puesto que esta no llega al observador en la posicion que hemos indicado. Por la misma razon no se forman tampoco en la superficie inferior CA del segundo prisma; y por otra parte, aunque se pinte esta superficie con tinta de China ú otra cualquiera sustancia capaz de absorver la luz, los anillos no sufren ninguna alteracion. Luego es forzoso inferir que se forman por la reflexion de la luz entre las dos superficies contiguas de los prismas.

La luz que se trasmite, atravesando la lámina de aire, produce tambien anillos de color, como se puede comprobar mirando al cielo por medio del sistema de los dos prismas, colocados un poco distantes del ojo. Esta segunda especie de anillos presenta los mismos contornos que los anteriores: pero sus colores son diferentes y mucho mas débiles. Mas adelante los estudiaremos, despues que hayamos examinado los que produce la reflexion.

Se pueden formar anillos de colores, comprimiendo asi uno contra otro dos prismas de cualquiera sustancia. Se pueden tambien formar colocando una superficie de vidrio sobre un plano de resina, de metal, de vidrio metálico ó de cualquiera otra sustancia pulimentada. Los anillos se presentan tambien en el vacío mas perfecto que se puede formar con nuestras máquinas neumáticas, y se mantienen igualmente cuando se calientan los vidrios hasta el punto de ablandarlos y soldarlos uno á otro. Si por estos métodos se pudiera arrojar enteramente el aire, se deberia concluir que los anillos no eran producidos por la accion propia de la lámina de aire interpuesta entre ambos prismas; pero aunque es imposible llegar fisicamente á este límite, á lo menos la permanencia de los fenómenos, por mas que nos aproximemos á él, indica de un modo evidente que subsistirian aun si se pudiese arrojar enteramente el aire de entre las dos superficies. En efecto, las leyes halladas por Newton demuestran que en este caso estremo las dimensiones de los anillos sufririan solamente un pequeño aumento casi insensible á las esperiencias mas delicadas.

No es tampoco necesario que la lámina delgada sea de aire, ni que se halle comprimida entre dos cuerpos sólidos. Una capa de agua, de alcool, de eter ó de cualquiera otro líquido evaporable, estendida sobre un vidrio negro, produce colores semejantes cuando la evaporacion la ha hecho suficientemente delgada; pero como el grueso de una capa semejante varía siempre de un modo irregular, las tintas que se desenvuelven en ella siguen toda la irregularidad de sus ondulaciones.

En general, cualesquiera que sean las sustancias empleadas para formar estos anillos, y de cualquier modo que se combinen, los colores que producen son siempre los mismos, y colocados en un órden exactamente parecido desde los gruesos meno-

res hasta los mayores. Solo se diferencian en la estension absoluta del espacio que ocupan los colores de cada anillo, la cual varía segun la naturaleza de la sustancia y la degradacion mas ó menos rápida de los gruesos. Segun esto, el órden natural que debemos proponernos en nuestras investigaciones sobre estos fenómenos debe ser: 1.º determinar el órden y sucesion de los colores de los anillos en una lámina de cualquiera naturaleza, pero cuyos gruesos varíen de un modo regular y conforme á una ley conocida: 2.º hallar respecto á esta sustancia las relaciones de los gruesos con los colores; y 3.º comparar estas relaciones en diferentes sustancias, y ver qué es lo que tienen de comun ó de diferente.

El órden en que se hallan colocados los colores en los diferentes anillos puede estudiarse bastante bien observando los que se forman entre dos prismas, sobre todo si se elijen casos en que estos anillos sean bastante anchos, y se dilatan aun observándolos con una lente. Sin embargo, es e método no es susceptible de una grande exactitud, porque estableciéndose ordinariamente la adherencia de los prismas por medio de una presion violenta é irregular, los anillos que resultan son tambien casi siempre irregulares, y algunas veces se forman muchos centros de presion, y por consiguiente muchas manchas negras, desde las cuales se degradan continuamente los colores, y componen series de anillos que se mezclan unas con otras. Asi, para llegar mas allá de lo que nos hacen conocer estas primeras observaciones, es necesario emplear algun otro aparato que haga ver los mismos fenómenos con mayor regularidad; lo cual se consigue colocando uno sobre otro dos vidrios esféricos de diferentes curvaturas. Si las superficies de estos vidrios estan bien trabajadas no pueden tener mas que un solo punto de contacto, desde el cual va aumentando siempre el espacio comprendido entre ellas, segun las leyes geométricas que resultan de la diferencia

de sus rayos. Ademas, la poca curvatura que se da ordinariamente á estos vidrios hace que la luz que los atraviesa llegue á la capa de aire sin haber sufrido una dispersion sensible. Esta disposicion es, pues, eminentemente favorable para tomar medidas exactas de las dimensiones de los anillos, y poder comparar sus tintas con los gruesos correspondientes, como lo ha hecho Newton. Entre todas las combinaciones posibles de curvatura ha elejido siempre uno de los dos vidrios plano, y el otro de igual convexidad en sus dos superficies, porque esta disposicion es la que presenta mayor facilidad para la determinacion exacta de las dos curvaturas, porque se puede comprobar por medio de la reflexion que un vidrio es plano, y se puede determinar el radio de un vidrio igualmente convexo, midiendo la distancia que concentra los radios simples que caen paralelamente sobre una de sus superficies.

Cuando un vidrio convexo de un gran radio se halla colocado sobre un vidrio plano, y comprimido suavemente contra él para establecer mejor el contacto, los anillos de colores se presentan regulares, distintos, y con la mancha negra en su centro. En tal caso cada zona circular de la lámina de aire refleja el color que corresponde á su grueso; y por consiguiente, si se aumenta este poco á poco, como se puede hacer levantando con mucho cuidado el vidrio superior, los colores que se reflejan á una misma distancia del centro deben variar, y los colores que al principio formaban los anillos mas distantes del centro deben venir gradualmente refugiándose á él, hasta que el grueso del aire, aun en este punto, llegue á ser demasiado grande, y desaparezcan sucesivamente, cediendo el sitio á los que estaban mas separados. Pero como en este último punto en que desaparecen, la distancia de los vidrios varía insensiblemente por hallarse tangentes uno á otro, se sigue que cada color, luego que haya llegado á él, debe estenderse enteramente y ha-

çerse muy ancho, lo cual le hace mas fácil de distinguir. Esta sucesion, cuya lentitud puede variarse segun se quiera, ofrece un medio tan sencillo como exacto para determinar la especie y colocacion de las tintas que componen los anillos.

Newton hizo esta esperiencia con un vidrio convexo, cuyas dos superficies trabajadas sobre una misma esfera tenian 51 pies ingleses de radio; y tanto por los resultados que le dió como por las observaciones que anteriormente habia hecho con los prismas, fijó en los términos que van á leerse el órden y serie de las tintas que componian los anillos circulares.

"Despues de la mancha central trasparente formada en el contacto de los vidrios, venian el azul, el blanco, el amarillo y el rojo. El azul era en tan corta cantidad, que yo no podia distinguirle en los anillos producidos por los prismas, en los que tampoco podia distinguir bien ningun violado; pero el amarillo y el rojo eran bastante abundantes, y ocupaban con corta diferencia tanto como el blanco, y cuatro ó cinco veces mas que el azul. Inmediatamente despues de esta primera serie venia otra en que se distinguian el violado, el azul, el verde, el amarillo y el rojo: todos estos colores eran abundantes y vivos, escepto el verde que era en muy pequeña cantidad, y que parecia mucho mas pálido y débil que el resto. El violado ocupaba menos espacio que ninguno de los otros cuatro colores, y el azul menos que el amarillo y el rojo. La tercera serie de colores eran el de púrpura, azul, verde, amarillo y rojo; el purpúreo parecia mas rojizo que el violado de la serie anterior, y el verde era mucho mas visible, siendo tan vivo y en tan gran cantidad como cualquiera de los otros colores, escepto el amarillo; pero el rojo empezaba á empañarse un poco tirando mucho á púrpura. En seguida venia la cuarta serie, compuesta de verde y rojo; el primero era abundante y muy vivo, tirando

por un lado al azul y por otro al amarillo; pero en esta cuarta serie no habia ni violado, ni azul ni amarillo, y el rojo era muy imperfecto. Los colores que se sucedieron á estos eran cada vez mas débiles é indecisos, hasta que despues de tres ó cuatro revoluciones degeneraron insensiblemente en blanco. En la fig. 2 se han indicado por las letras del alfabeto los diferentes sitios que ocupaban todos los colores cuando los vidrios estaban unidos uno á otro, de manera que hacian aparecer todos á un tiempo con la mancha negra en el centro. En este caso su distribucion y órden, contado desde el centro, era: NEGRO, azul, blanco, amarillo, rojo; VIOLADO, azul, verde, amarillo, rojo; PURPUREO, azul, verde, amarillo, rojo; VERDE rojo; AZUL VERDOSO, rojo; AZUL VERDOSO, rojo pálido; AZUL VERDOSO, blanco rojizo (1)."

Hechas estas observaciones, Newton pasó á medir los diámetros de los anillos usando de los mismos vidrios; pero entonces cuidó de colocarlos simplemente uno sobre otro, sin producir ninguna presion que hubiera podido alterar su curvatura natural; en seguida, colocando su ojo sobre los anillos lo mas perpendicularmente que pudo, midió los diámetros de los seis primeros en la parte mas brillante de sus órbitas, que respecto al primero y mas interior, se hallaba poco mas ó menos entre el blanco y el amarillo; en el segundo entre el naranjado y el amarillo; en el tercero en el amarillo mismo; en el cuarto entre el verde amarillento y el rojo; y en el quinto y sesto entre el azul verdoso y el rojo, y siempre casi en medio del espacio que cada anillo ocupaba. Ahora bien, la geometría demuestra que el intervalo entre dos esferas, ó entre un plano y una esfera que se tocan, aumenta

(1) Los colores cuyos nombres estan escritos con letras mayúsculas son los que forman el principio de cada anillo contado desde la mancha central; y los anillos mas oscuros son los que estan marcados con líneas en la fig. 2.

como el cuadrado de las distancias al punto de contacto. Newton formó, pues, los cuadrados de todos los diámetros que habia medido; y comparando estos cuadrados entre sí, empezando por el mas pequeño, halló que seguian la serie de los números impares 1, 3, 5, 7, 9...., de donde dedujo que los gruesos del aire en el sitio en que aparecian los anillos terminados por estos diámetros seguian tambien las mismas relaciones.

Para hacer estas observaciones con toda exactitud es necesario colocar el ojo lo mas próximo que sea posible á la vertical que pasa por el centro de todos los anillos, á fin de evitar las dilataciones que sufren por la oblicuidad de los rayos en la superficie de los vidrios. Por la misma razon es menester medir los diámetros, no en el plano de incidencia por el que llega la luz, lo cual daria diferentes oblicuidades á los rayos que viniesen al ojo de los estremos de un mismo diámetro, sino trasversalmente á la direccion de incidencia y perpendicular á su plano, como representa la fig. 3. En fin, como los diámetros se miden en la superficie superior del vidrio, y los anillos se forman realmente en su superficie inferior, es necesario contar con las refracciones que sufren al atravesarle, y correjir su efecto por medio del cálculo. Newton no descuidó ninguna de estas precauciones, y se conocerá su necesidad cuando se conozca cuál es la pequeñez de los gruesos que se tratan de apreciar.

Newton midió igualmente el diámetro de los anillos en sus partes mas obscuras, que en el primero correspondia al medio de la mancha central, en el segundo al violado obscuro, en el tercero al azul obscuro, y en el cuarto, quinto y sesto al principio del azul verdoso. Formó del mismo modo los cuadrados de estos diámetros para conocer los gruesos correspondientes de la lamina de aire, y halló que seguian la progresion de los números pares 0, 2, 4, 6...., contando o por la mancha central.

Por consiguiente los gruesos de la lámina de aire en las partes mas obscuras de los seis primeros anillos seguian tambien la misma progresion. "Y como es una operacion delicada y dificil, añade Newton, el tomar estas medidas, las tomé diferentes veces y sobre diversas partes del vidrio, á fin de que su uniformidad me convenciese de su exactitud. El mismo método empleé para fijar los resultados de algunas de las observaciones siguientes. Pronto veremos que este grande hombre no se contentaba fácilmente.

Ya la ley anterior nos da razon de un fenómeno, que es muy fácil observar, formando anillos con objetivos cuyo radio sea poco considerable, y es que estos anillos se acercan unos á otros al paso que se alejan de la mancha central, y tanto mas, cuanto mas distantes se hallan. En efecto, siguiendo los cuadrados de sus diámetros la progresion de los números impares 1, 3, 5, 7 &c., los diámetros serán proporcionales á las raices cuadradas de estos números; de suerte que formarán la serie siguiente en que el diámetro del primer anillo en su parte mas brillante está representado por la unidad.

Cuadrado de los diámetros.	Diámetros.	Diferencia de los diámetros consecutivos.
1	1,00000	0,73205
3	1,73205	0,50402
5	2,23607	0,40968
7	2,64575	0,35425
9	3,00000	0,31663
11	3,31663	0,28892
13	3,60555	
15	3,87298	0,26743
101	10,04988	
103	10,14890	0,20099

Se ve, pues, que la diferencia de los anillos consecutivos va disminuyendo sin cesar desde la

mancha central, lo cual está conforme con la observacion.

Hasta aqui no hemos hablado mas que de la ley con que varían los diámetros sucesivos; pero para completar estos resultados es necesario tener el tamaño absoluto de uno de ellos. Midiendo este tamaño con un cuidado estremo en los vidrios empleados para las esperiencias anteriores, halló Newton que respecto á la parte mas luminosa del sesto anillo, era igual á $\frac{55}{100}$ de pulgada inglesa. Pero algun tiempo despues, temiendo no haber determinado el diámetro del vidrio convexo con bastante exactitud para una operacion tan delicada, volvió á empezar la esperiencia con otro objetivo doblemente convexo, cuyas dos superficies estaban trabajadas sobre una misma esfera. La distancia focal media de este vidrio era de 83,4 pulgadas, y su relacion de refraccion $\frac{17}{11}$, de donde se deduce por el cálculo que cada una de sus superficies tenia por diámetro 182 pulgadas. Newton colocó este vidrio convexo sobre otro plano, de suerte que la mancha negra aparecia en medio de los anillos de colores, sin mas presion que la del peso del vidrio. Despues de esto, midiendo el diámetro del quinto anillo obscuro con la mayor exactitud que le fue posible, halló que era exactamente igual á la quinta parte de una pulgada. Esta medida la tomó con un compás en la superficie superior del vidrio convexo, manteniendo su ojo elevado como á ocho ó nueve pulgadas de esta superficie, y casi perpendicularmente sobre el centro del vidrio, que tenia un sesto de pulgada de grueso. Segun esta disposicion, el verdadero diámetro del anillo en la segunda superficie del vidrio debia ser un poco mayor, y el calculo hace ver que para obtenerle exactamente era necesario aumentar el diámetro aparente $\frac{1}{79}$, ó lo que es lo mismo, multiplicarle por $\frac{80}{79}$; y como habia hallado que era de $\frac{1}{5}$ de pulgada, este aumento le eleva á $\frac{1}{5} \times \frac{80}{79} = \frac{16}{79}$ de pulgada, de donde se

sigue que su verdadero radio era de $\frac{8}{79}$ de pulgada.

Ahora bien, cuando un vidrio convexo se halla colocado sobre un vidrio plano, el grueso del aire ó la distancia de los vidrios en el perímetro de cualquier anillo es igual al cuadrado del radio del anillo dividido por el diámetro de la esfera sobre que se ha trabajado, como puede demostrarse por el cálculo. Aplicando esta regla al caso actual, siendo el radio del quinto anillo obscuro de $\frac{8}{79}$ de pulgada, su cuadrado será $\frac{64}{6241}$, que dividido por 182, valor del diámetro de la esfera, dará $\frac{64}{6241 \cdot 182}$ ó $\frac{64}{1135862}$ de pulgada, ó reducida $\frac{1}{17747,84}$ de pulgada. Ahora bien, como por la observacion anterior sabemos que los gruesos del aire en los perimetros de los anillos obscuros siguen la progresion 0, 2, 4, 6, 8, 10 &c. en que el quinto se halla representado por 10 y la mancha central por 0, se ve que tomando el quinto del grueso del aire del quinto anillo en que es como 10, se tendrá el grueso correspondiente al primero en que es como 2. Tomando, pues. $\frac{1}{5}$ de la refraccion $\frac{1}{17747,84}$, se tendrá $\frac{1}{88739}$ de pulgada por grueso de la primera lámina de aire en el perimetro del primer anillo obscuro. Newton repitió las mismas pruebas con otros muchos vidrios convexos de diferentes curvaturas, y aun en partes de vidrios convexos, para escluir los errores que pudieran nacer de las desigualdades del trabajo de estos vidrios, y obtuvo siempre resultados conformes á los anteriores.

Es de presumir que todos estos vidrios no eran de una composicion rigorosamente igual, y por lo mismo debia haber diferencias entre sus poderes refringentes. Si á pesar de estas diferencias han dado todos de acuerdo los mismos gruesos á los mismos anillos, es preciso deducir que los colores reflejos de este modo en cada grueso de la lámina de aire son propios de este grueso, y no dependen de la naturaleza del medio que los rodea. En seguida veremos que esta consecuencia es general; cualquiera

que sea la sustancia que la rodee, la tinta que la lámina refleja bajo la incidencia perpendicular respecto á un grueso determinado, es independiente de la naturaleza del medio, y solo es variable la intensidad de este color.

Las medidas que acabamos de referir fueron tomadas del modo que indica la fig. 3, perpendicularmente al plano de reflexion tirado por la mancha central, de suerte, que los ángulos de incidencia y reflexion de los rayos en la lámina de aire eran con muy corta diferencia los mismos respecto á los diversos anillos, y por consiguiente solo falta saber cuáles eran estos ángulos para fijar la incidencia bajo la cual se hizo la observacion, pues hemos dicho que los anillos aumentan, al paso que es mas oblicua la incidencia de los rayos de luz sobre la lámina de aire. Newton nos dice que cuando hacia estas observaciones su ojo se hallaba elevado ocho ó nueve pulgadas sobre el plano de los anillos, y que estaba separado de los rayos incidentes 1.25 pulgadas, de donde se puede deducir por el cálculo que la incidencia de los rayos de luz sobre la lámina de aire era como de unos 4°. Ahora bien, segun las leyes del aumento de los anillos, que esplicaremos pronto, se halla que en razon de la pequeñez de este ángulo basta para conducirlos al caso de la incidencia perpendicular, disminuirlos en la proporcion del rayo á la secante de cuarto, es decir, en la relacion de 10000 á 10024, ó lo que es lo mismo, multiplicarlos por la fraccion $\frac{10000}{10024}$. Hecha esta operacion el grueso de la lámina de aire en la circunferencia del primer anillo oscuro, bajo la incidencia perpendicular, se reduce á $\frac{1}{88952}$, y otra esperiencia, cuyos pormenores omitimos, da $\frac{1}{89063}$. La media proporcional aritmética será $\frac{1}{89000}$ de pulgada, y este el resultado en que se ha fijado Newton. Ahora bien, puesto que el primer anillo oscuro está representado por 2 cuando en la parte mas brillante lo está por 1, se sigue que tomando la mi-

tad de $\frac{1}{89000}$, se tendrá el grueso del aire en el sitio mas brillante del primer anillo, que será $\frac{1}{178000}$ de pulgada.

Y como en general los gruesos de la lámina de aire en las partes mas brillantes de los anillos siguen la progresion aritmética 1, 3, 5, 7, 9, y los gruesos de esta misma lámina en los puntos mas oscuros siguen la progresion intermedia 2, 4, 6, 8, 10, se ve que conocido el grueso absoluto del primero ó de cualquiera de estos anillos se tiene al momento el de todos los otros; de suerte que los diferentes valores de estos gruesos en fracciones de pulgada inglesa serán:

respecto á la parte mas brillante de los anillos

$\frac{1}{178000}$, $\frac{3}{178000}$, $\frac{5}{178000}$, $\frac{7}{178000}$,

y respecto á sus partes mas oscuras

$\frac{2}{178000}$, $\frac{4}{178000}$, $\frac{6}{178000}$, $\frac{8}{178000}$.

Estos valores son relativos á la incidencia perpendicular; y para hacerlos generales es necesario determinar las dilataciones que sufren los anillos por el cambio de inclinacion de los rayos sobre la lámina de aire que los refleja.

Nada es mas fácil que observar estas variaciones; pues basta observar los anillos, colocando el ojo lo mas próximo posible á la perpendicular á su superficie, y separarse en seguida poco á poco de esta posicion, para observarlos oblicuamente, pues entonces se les ve estenderse circularmente hácia todas partes. Para conocer la ley de esta dilatacion midió Newton el diámetro de un mismo anillo con diferentes grados de oblicuidad, fijándose siempre en uno mismo de los colores que le componian, y dedujo el grueso del aire que en cada esperiencia reflejaba este color. Pero para estender estas medidas hasta las mayores incidencias en que los rayos visuales eran muy oblicuos respecto á la lámina de aire, tuvo que abandonar los objetivos, y sustituir á ellos prismas, porque en razon de la poca curvatura de los objetivos, los rayos de

luz que pasan de su segunda superficie a la lámina de aire son casi siempre paralelos á los rayos incidentes. Asi, para que sean muy oblicuos sobre la lámina de aire es preciso que los rayos visuales tengan con corta diferencia la misma oblicuidad sobre las superficies de incidencia. Entonces la curvatura del vidrio superior desfigura los anillos, y tanto por este efecto como por la posicion poco ventajosa del ojo, las medidas de los diámetros se hacen muy dificiles y poco seguras. Estas causas de error se evitan formando los anillos entre prismas por medio de una luz refracta, que entrando por una cara y saliendo por otra, pueda llegar á la lámina delgada con las mayores incidencias; pero entonces para evitar los efectos de la dispersion es necesario que la luz sea simple y homogénea. Los pormenores corresponden al cálculo; aqui nos limitaremos á decir que reuniendo los resultados de este método con los que le habian dado los objetivos, ha compuesto la tabla siguiente, que se estiende á todos los ángulos de emergencia posible sobre la lámina de aire desde 0° hasta 90°.

Angulo de incidencia sobre la segunda superficie del vidrio.	Angulo de emergencia en el aire.	Diámetro del anillo.	Grueso del aire.
0° 00′	0° 00′	10	10
6 26	10 00	10 $\frac{1}{13}$	10 $\frac{9}{13}$
12 45	20 00	10 $\frac{1}{3}$	10 $\frac{2}{3}$
18 49	30 00	10 $\frac{3}{4}$	11 $\frac{1}{2}$
24 30	40 00	12 $\frac{2}{5}$	13
29 37	50 00	12 $\frac{1}{2}$	15 $\frac{1}{2}$
33 58	60 00	14	20
35 47	65 00	15 $\frac{1}{4}$	23 $\frac{1}{4}$
37 19	70 00	16 $\frac{4}{5}$	28 $\frac{1}{4}$
38 33	75 00	19 $\frac{1}{4}$	37
39 27	80 00	22 $\frac{6}{7}$	52 $\frac{1}{4}$
40 00	85 00	29	84 $\frac{1}{10}$
40 11	90 00	35	122 $\frac{1}{2}$

Las dos primeras columnas no necesitan ninguna esplicacion, y solo observaremos que segun la manera con que se han hecho las observaciones, los ángulos de incidencia y emergencia pueden tomarse indiferentemente respecto al rayo incidente y al refracto; porque tomándose las medidas de los anillos de M á M, fig. 4, en el diámetro transversal, perpendicular al plano central de incidencia OCH, los rayos visuales que las limitan atraviesan en estos estremos las dos superficies de la lámina de aire, en puntos en que sus tangentes son sensiblemente paralelas. Síguese de aqui que las observaciones de Newton, aunque hechas con láminas curvas, convienen en realidad á láminas de un mismo grueso; y sus resultados pueden aplicarse á láminas curvas cuando las curvaturas de sus superficies en los puntos en que las atraviesa el rayo luminoso tienen tan poca diferencia entre sí, que los ángulos de incidencia y emergencia medidos en una ú otra no produzcan, segun nuestra tabla, sino variaciones in-

sensibles en los diámetros de los anillos. Esto es lo que se verificaria, por ejemplo, en láminas muy delgadas de aire comprendidas entre objetivos de muy poca curvatura, aun cuando las medidas de los anillos que se formasen entre ellos se tomasen sobre el diámetro situado en el plano de incidencia, solo que seria preciso aplicar correcciones diferentes á sus dos estremos por la diferente incidencia de los rayos en estos puntos.

La tercera columna de la tabla espresa los diámetros sucesivos que adquiere un mismo anillo cualquiera visto con distintas oblicuidades, representando su diámetro por 10 bajo la incidencia perpendicular. En fin, la cuarta columna, formada por los cuadrados de la tercera divididos por 10, espresa los gruesos sucesivos de la lámina de aire en que se refleja este anillo bajo diferentes oblicuidades, representando por 10 el grueso á que se refleja bajo la incidencia perpendicular. Esta tabla es comun á todos los anillos, cualquiera que sea su distancia á la mancha central, pues por una propiedad muy digna de atencion la proporcion que sigue el aumento del diámetro de cada anillo es independiente del sitio que ocupa y del color particular que refleja.

Esto manifiesta que un mismo color se refleja sucesivamente en un grueso mayor á medida que son mas oblicuos los rayos incidentes; y por tanto si se observa un mismo punto de la lámina de aire bajo diferentes oblicuidades, los colores que pasen por este punto serán los que anteriormente se reflejan por menores gruesos. Asi puede decirse que haciendo mayor la oblicuidad de los rayos incidentes con la lámina de aire, se produce el mismo efecto que si esta lámina se hiciese mas delgada.

Para poder hacer un uso seguro y cómodo de estos resultados es necesario tratar de unirlos entre sí por una ley analítica que los represente, sino de una manera enteramente exacta, á lo menos bas-

tante aproximada, como lo ha hecho Newton.

Concentrados de este modo, se ve que la dilatacion del diámetro de cada anillo, producida por la oblicuidad, es tanto menor, cuanto mas próximo se halle este anillo á la mancha central, de suerte que los anillos contiguos dilatándose deben marcarse mas, y por consiguiente hacerse mas visibles, como manifiesta la observacion.

Segun la misma ley, la dilatacion no debe ser enteramente nula, sino en el medio mismo de la mancha central en donde se tocan los vidrios; y en efecto, se observa tambien una dilatacion poco considerable, pero sin embargo sensible, en el perímetro de esta mancha si se la mira muy oblicuamente. Pero al estenderse de este modo, se introduce en las partes de la lámina de aire que bajo la incidencia perpendicular reflejaban la tinta mas inmediata al negro, es decir, el blanco; por consiguiente la reflexion en la lámina de aire se hace entonces nula en estos puntos sin que lo sea su grueso. Segun esto, cuando se miran los vidrios bajo cualquiera otra inclinacion y aun bajo la perpendicular, se debe suponer que la transmision total no se verifica solo en el punto en que se tocan los vidrios, sino tambien á alguna distancia al rededor de este punto. Esto esplica por qué cuando los vidrios sobrepuestos son muy poco curvos, cualquiera que sea la esfericidad, la estension de la mancha negra, ordinariamente escede mucho á la que se puede atribuir racionalmente al punto de contacto. Este resultado, minucioso en apariencia, es muy importante en su efecto; porque es directamente contradictorio al sistema de la propagacion de la luz por ondulacion, no pudiendo segun este sistema llegar á ser nula la reflexion sino cuando lo sea tambien el grueso de la lámina. Asi lo ha conocido muy bien Euler, el propagador mas acérrimo de este sistema; y no ha hallado otro recurso que el de desechar este hecho diciendo que no era constante,

y que Newton se habria tal vez equivocado al observarle.

Hasta aqui solo hemos observado los anillos producidos por la reflexion; y es necesario que consideremos tambien los que la reflexion produce. En este caso la mancha central es blanca, rodeada de un círculo negruzco, al que sue de otro círculo blanco, y en seguida otros de diferentes colores. Pero estos son mucho mas débiles que los que la reflexion produce, y es difícil distinguir bien sus especies á no inclinar mucho los rayos incidentes sobre la lámina de aire, lo cual aumenta su vivacidad. Newton las observó al traves de sus grandes objetivos, y halló que estaban dispuestos en el órden siguiente empezando desde la mancha blanca central; BLANCO, rojo amarillento, negro, violado, azul; BLANCO, amarillo, rojo, violado, azul; VERDE, amarillo, rojo; VERDE AZULADO, rojo; y en seguida la coloracion viene á ser insensible. El primer rojo amarillento, intermedio entre la mancha blanca central y el anillo negruzco, era tan pálido y tan poco diferente del blanco, que costaba trabajo distinguirle. Otro tanto sucede con el primer azul que rodea la mancha negra central en los anillos reflejos, como hemos visto en las primeras observaciones sobre estos anillos.

Comparando el órden de estos colores con los que forman los anillos reflejos, se ve que son sus complementos. Por ejemplo, la mancha blanca central es complemento de la mancha negra central de los anillos reflejos; y está formada por la luz que atraviesa el aire en este sitio, sin sufrir ninguna reflexion en su segunda superficie. Del mismo modo el círculo negruzco que rodea al rojo amarillento es consecuencia necesaria del círculo blanco que rodea la mancha negra en los anillos reflejos, y uno de estos círculos debe ser opuesto al otro, como que está formado de la parte de luz blanca que se sustrae en este punto á la reflexion, de suerte, que

cuanto mayor sea esta en la lámina de aire, mas obscuro será el círculo negruzco, y si la reflexion pudiera ser total seria enteramente negro. Pero este caso estremo no puede verificarse, porque en todos los cuerpos diáfanos, cualquiera que sea el medio que los rodee, la reflexion bajo la incidencia perpendicular es siempre muy débil. La oposicion de los círculos siguientes está igualmente indicada por el órden de los colores que son complemento en ambas series, pero ademas ha sido comprobada directamente por Newton, midiendo los diámetros de los anillos transmitidos en su parte mas brillante y en la mas obscura, En efecto, diseñó la fig. 5 en que AB, A′B′ son las superficies de los vidrios uno plano y otro esférico, que se tocan en C. Las líneas negras trazadas entre los dos, son las distancias de estas superficies en progresion aritmética; los colores escritos á la parte superior son los que produce la luz refleja, y los de la parte inferior los que nacen de la luz transmitida.

Hasta aqui solo se han considerado los anillos producidos por láminas delgadas de aire comprendidas entre dos vidrios, y se ha determinado por medio de medidas exactas los gruesos á que se forman, tanto bajo la incidencia perpendicular, como bajo las incidencias oblicuas. Para adquirir ahora nociones mas generales de este fenómeno, considéresele en otras sustancias, por ejemplo, en láminas delgadas de agua. Para formar estas del modo mas sencillo, Newton sobrepuso al principio dos objetivos, uno plano y otro convexo, como para formar anillos en una lámina de aire; y luego que estos aparecieron mojó lijeramente los bordes de los vidrios sin moverlos. El agua se introdujo inmediatamente entre ellos por un efecto de la atraccion capilar, y sustituyéndose poco á poco en lugar del aire, debió tomar la forma del intervalo que aquel llenaba. Asi, pues, se produjo una lámina delgada de agua entre dos superficies de vidrio, y los anillos de co-

lor aparecieron en esta lámina del mismo modo que en la de aire. Su órden era el mismo, asi como la colocacion de sus colores; pero sus tintas eran mas débiles y su estension menor. Newton midió sus diámetros en las partes mas brillantes, y halló que los cuadrados de estos diámetros seguian la progresion aritmética de los números impares 1, 3, 5, 7, &c. Los midió tambien en los puntos mas obscuros, y entonces sus cuadrados siguieron la progresion de los números pares 0, 2, 4, 6, 8, &c. exactamente como en la lámina de aire. Pero los diámetros de los anillos correspondientes eran mas pequeños que en la lámina de aire en la razon de 7 á 8; de donde se sigue que los gruesos correspondientes que son proporcionales á los cuadrados de los diámetros eran entre sí como 49 á 64, ó poco mas ó menos como 3 á 4, es decir, en la relacion del seno de incidencia al seno de refraccion, cuando la luz pasa del agua al aire, y acaso añade Newton pudiera deducirse como regla general que si se interponen otras materias de cualquiera naturaleza entre dos vidrios, los gruesos en que se forman los mismos anillos son proporcionales á los senos de las refracciones que los rayos sufren en estas materias, penetrando en ellas con una misma incidencia; de suerte que cada anillo exige un grueso tanto mas pequeño, cuanto mas refringente es la sustancia comprendida entre los dos vidrios.

En todas las esperiencias anteriores las láminas de agua ó de aire comprendidas entre las dos superficies de vidrio se hallaban rodeadas de un medio mas refringente que ellas. Para completar estas observaciones falta examinar los colores producidos en las circunstancias opuestas, es decir, sobre láminas mas refrigentes que el medio que las roden. Tal es la marcha seguida por Newton, que ha estudiado particularmente bajo este punto de vista los colores producidos por las bombitas de agua de jabon, haciendo de este modo servir para des-

cubrimientos muy importantes lo que hasta entonces solo habia sido un juego de niños.

No solo no se desdeñó Newton de fijar su atencion en estas bombitas, sino que hizo estudio para formarlas bien, y de modo que pudiesen ser objeto de observaciones exactas. Esto exige algunas precauciones: es preciso ante todo hacer disolver en agua destilada ó en agua llovediza un pedazo de buen jabon sólido, en tal cantidad que la disolucion no quede enteramente saturada; hecho esto se introduce en esta agua el estremo de un tubo de vidrio que levante una pequeña columna de líquido en virtud de su capilaridad, se retira el tubo, y despues de haberle enjugado por la parte esterior se sopla suavemente por el otro estremo. La columna líquida cede á esta presion, sale del tubo, y se hincha, formando una bola que se adhiere á la parte inferior del tubo. Si entonces se deja de soplar y se deja el tubo abierto, la atraccion capilar que este ejerce sobre el agua favorece la presion que sufre en su superficie, y la hace disminuir poco á poco, y al fin entran completamente en el tubo: pero se pueden impedir estas variaciones, ya cerrando el tubo con un poco de cera blanda para impedir que salga el aire despues de formada la bola, ó bien no teniéndola suspendida al tubo, sino haciéndola nacer en la misma agua de jabon, y dejándola nadar libremente en ella. Cuando se emplea este último método es preciso que el vaso que contiene la disolucion sea bastante ancho para que la accion capilar de sus paredes no de a la superficie del líquido sino una curvatura insensible; y ademas es necesario que esté lleno hasta los bordes, pues de otro modo la bombita es conducida á ellos insensiblemente, y se deshace. Pero todas estas precauciones no bastarian si se dejasen las bombitas espuestas al aire libre; porque este fluido, que siempre se halla agitado, turva con sus movimientos la regularidad de su equilibrio, las deseca muy

pronto acelerando la evaporacion de la película de agua que las compone, y rebientan á muy poco tiempo. Para darlas mayor duracion y observarlas en un estado constante es necesario, si se les quiere dejar al estremo del tubo, introducir este cargado del líquido en un frasco de vidrio delgado, fig. 6, cuyo orificio superior se cierra con un tapon agujereado, por donde pasa el tubo, y que se pone y quita al mismo tiempo que él. Se forma la bombita dentro del frasco, y cerrando el tubo con cera, puede sostenerse por algunas horas sin que su volúmen se altere sensiblemente. Estando en esta disposicion, como el líquido se inclina siempre á bajar á la parte inferior de la bola, en este punto es donde tiene mayor grueso, y desde él va adelgazando la película hácia la parte superior hasta una pequeña distancia de su punto de adhesion donde la accion capilar del tubo produce un nuevo aumento de grueso. Esta última causa de desigualdad no existe en el primer método en que se deja á la bombita nadar libremente sobre la superficie de la disolucion; pues entonces es perfectamente hemisférica; y la degradacion de su grueso, determinada únicamente por la gravedad, continúa desde su base hasta su parte superior con la mas perfecta regularidad. De este modo formaba Newton sus bombitas, añadiendo siempre la precaucion de cubrirlas con una campana de vidrio delgado y transparente para preservarlas de la accion del aire. Para observarlas cómodamente, se debe colocar el aparato delante de una ventana abierta desde donde se pueda descubrir una gran parte de horizonte, y recibir por reflexion sobre la bola la luz blanca del cielo. Ademas para que ninguna luz estraña venga á mezclarse á esta reflexion, conviene que la parte esterior del vaso que contiene la disolucion sea de algun color obscuro; y en fin, es necesario colgar un paño negro mas allá de la bola al lado opuesto al ojo, á fin de interceptar los rayos de luz, que

viniendo en esta direccion de los objetos esteriores, pudieran atravesar la bola y llegar al ojo al mismo tiempo que los colores reflejos que quieren observarse. Dispuesto todo de esta suerte, se perciben en la bola muchos anillos concéntricos horizontales, cuyos colores son muy vivos, y dispuestos con una perfecta regularidad. Al principio se manifiestan en la parte superior de la bola en su parte menos gruesa; pero al paso que el agua corriendo hácia abajo la adelgaza mas y mas, se ven dilatarse progresivamente los anillos estendiéndose á toda su superficie, y despues que han aparecido asi alternativamente varias series de colores en el centro de los anillos, se forma en él una mancha negra, muy pequeña al principio, y que en seguida va dilatándose hasta que revienta la bola, que es como siempre acaba. Como estos colores son mas vivos y mas estensos que los que se producen en las láminas delgadas de aire, se puede distinguir mejor su órden, su sucesion y sus diferentes especies. Esta observacion, una de las mas hemosas que presenta la física, es de una indispensable necesidad para familiarizarse con los caractéres propios de cada tinta, para concebir bien su sucesion, y para poder seguir las leyes descubiertas por Newton acerca del modo con que se producen. He aqui la descripcion dada por él mismo.

Partiendo del punto inferior y por consiguiente de la parte mas gruesa de la bola hácia la superior, que es la mas delgada, se observan simultánea ó alternativamente siete series distintas de colores en el órden siguiente: ROJO, azul; ROJO, azul; ROJO, azul; ROJO, verde; ROJO, amarillo, verde, azul, púrpura; ROJO, amarillo, verde, azul, violado; ROJO, amarillo, blanco, azul, negro. El numero de estas series, el modo de sucederse sus colores y la especie de estos, todo es enteramente semejante á lo que hemos observado ya en las láminas delgadas de aire y agua comprendidas entre dos superficies de vidrio,

"Las tres primeras series de rojo y azul, dice Newton, eran de un color muy débil y sucio, sobre todo la primera en que el rojo casi parecia blanco. En estas tres series apénas habia otro color sensible que el rojo y el azul, y este (especialmente en la segunda serie) tiraba un poco á verde."

"El cuarto rojo era tambien débil y sucio, pero no tanto como los anteriores. En seguida venia un poco ó nada de amarillo, pero sí bastante verde que al principio era amarillento, y despues se cambiaba en un verde claro y vivo que últimamente degeneraba en un color azulado, mas al cual no seguia azul ni violado alguno."

"En la quinta serie el rojo tiraba al principio mucho al color de púrpura, y en seguida se hacia mas vivo y brillante, pero sin embargo no muy limpio. A este rojo sucedia un amarillo obscuro muy brillante, pero en muy pequeña cantidad, que se cambiaba al momento en un verde abundante un poco mas limpio, mas obscuro y mas vivo que el verde anterior. En seguida venia un escelente azul, un azul celeste muy brillante, y un color de púrpura muy brillante en menor cantidad que el azul, y muy parecido al rojo."

"En la sesta serie el rojo era al principio de un color punzó muy hermoso y vivo, y en seguida se hacia mas brillante, muy limpio, muy vivo, y el mas hermoso de todos los rojos. Seguíale un vivo naranjado, y en seguida un amarillo obscuro, brillante y copioso, que era tambien el mejor de los amarillos, y que se cambiaba primero en amarillo verdoso y despues en azul verdoso; pero el verde que se hallaba entre el amarillo y el azul era en tan pequeña cantidad y tan bajo, que mas bien parecia un blanco verdoso que un verdadero verde. El azul, que venia inmediatamente despues, se cambiaba en un azul celeste muy vivo y muy hermoso, aunque un poco inferior al azul celeste anterior, y el violado era obscuro, con poco ó nada

de rojo, y en menor cantidad que el azul."

"En la última serie el rojo aparecia al principio con una tinta castaña parecida al violado, la cual se cambiaba en el momento en un color mas brillante que tiraba al naranjado; el amarillo que seguia era al principio bastante bueno y vivo, pero en seguida se debilitaba hasta venir por grados á terminar en un blanco perfecto; y cuando el agua era bastante viscosa para que pudiera sostenerse la bola con tan pequeño grueso, este blanco se esparcia y dilataba lentamente sobre la mayor parte de la bola, haciéndose cada vez mas pálido, hasta que en la parte superior se hendia en varios puntos; y á medida que se ensanchaban estas hendiduras, aparecian de un azul celeste bastante bueno, pero algo obscuro y opaco. El blanco que se hallaba entre las manchas azules disminuía sucesivamente hasta que venia á ser enteramente parecido á las mallas de una red irregular, y en seguida se desvanecia dejando toda la parte superior de la bola á un azul obscuro que se dilataba hácia abajo como el blanco que acabamos de decir, hasta rodear algunas veces toda la bola. Sin embargo, en la parte superior, en que era el azul mas obscuro que en la inferior, y que aparecia lleno de muchas manchas redondas azules un poco mas obscuras que el resto, se presentaban una ó varias manchas enteramente negras, y dentro de estas se veian otras de un negro aun mas subido, las cuales se dilataban continuamente hasta que rebentaba la bola."

"Cuando el agua no era muy viscosa, se presentaban en el blanco manchas negras sin ninguna mezcla sensible de azul, y aun algunas veces se veian en el amarillo, en el rojo anterior, y acaso en el azul del segundo órden, antes que los colores medios tuviesen tiempo de desplegarse."

"Por esta descripcion se ve la grande afinidad que hay entre estos colores y los que se forman en las láminas de aire que hemos descrito anteriormen-

te; pues la serie de las tintas, pasando de los gruesos mas grandes á los mas pequeños, es absolutamente semejante."

"Observando en diferentes posiciones oblicuas los anillos de color que se presentaban en lo alto de la bola, hallé que se dilataban sensiblemente al paso que aumentaba la oblicuidad del ojo, aunque estaban muy distantes de dilatarse tanto como los que se producen en las láminas de aire; pues estudiando estos, hemos hallado que cuando se les miraba muy oblicuamente, llegaban á una parte de la lámina de aire mas de 12 veces mas gruesa que aquella en que aparecian cuando se les miraba perpendicularmente; en vez de que en el caso actual, los anillos vistos con toda la oblicuidad posible se hallaban en un sitio en que el grueso del agua era al que tenia en el sitio donde se veían por medio de rayos perpendiculares un poco menos que como 8 á 5. Segun mis observaciones mas exactas, era esta relacion entre 15 y 15½ á 10; de suerte que el aumento de estos anillos es 24 veces menor que el de los que se ven en una lámina de aire."

"Algunas veces adquiria la bola un grueso uniforme en todas partes, escepto hacia la parte superior junto á la mancha negra, lo cual inferí de que en todas las posiciones del ojo la bola presentaba la misma apariencia de colores, y en este caso los que se veían en la circunferencia aparente, por los rayos mas oblicuos, eran distintos de los que se veían en otros puntos por rayos menos inclinados á la bola. La misma parte de esta bola aparecia de diferentes colores á diversos espectadores que la miraban con distintas oblicuidades."

Observando asi las tintas en diferentes puntos de la bola bajo la incidencia perpendicular, y comparándolas con los de la misma clase y naturaleza que se observan en una lámina delgada de agua ó de aire, comprendida entre dos vidrios, Newton podia deducir las relaciones del grueso de la bola

en sus diferentes partes; y despues, considerando los diferentes puntos en que se colocaba una misma tinta mirándola bajo diversos ángulos, podia deducir el grueso del agua que la convenia en estas oblicuidades; y tanto por estas observaciones como por otras diferentes pruebas fundadas sobre los mismos pricipios formó la tabla siguiente, análoga á la que habia formado respecto á las láminas delgadas de aire.

Incidencia de los rayos en el agua.	Su refraccion al pasar por el agua.	Grueso del agua.
0° 0′	0° 0′	10
15 0	11 11	10 $\frac{1}{4}$
30 0	22 1	10 $\frac{4}{5}$
45 0	32 2	11 $\frac{4}{5}$
60 0	40 30	13
75 0	46 25	14 $\frac{1}{2}$
90 0	48 25	15 $\frac{1}{5}$

Las dos primeras columnas espresan las oblicuidades de los rayos con la superficie del agua. es decir, sus ángulos de incidencia y de refraccion; y el calculo está hecho suponiendo que los senos de estos ángulos son entre sí como 4 á 3 del mismo modo que si el agua estuviese pura, aunque probablemente el jabon que se halla disuelto en ella debe modificar un poco su fuerza refringente. En la tercera columna el grueso de la bola, por el cual se produce un color cualquiera, está espresado en décimas partes del grueso que produce este color siendo perpendiculares los rayos. Por esta tabla se ve que el mismo color se refleja sucesivamente en un grueso mayor al paso que se hacen mas oblicuos los rayos incidentes, y por lo mismo si se observan asi los colores en una lámina cuyo grueso fuese constante, al paso que aumentase la oblicui-

dad, se acercarian al centro de los anillos como si la lámina se adelgazase.

No solo estos resultados son análogos á los que hemos hallado antes respecto á las láminas delgadas de aire, sino que pueden unirse entre sí con la misma ley que entonces nos ha servido sin tener mas que hacer que cambiar la relacion constante del seno de incidencia al seno de refraccion, que era $\frac{11}{17}$ cuando la luz pasaba del vidrio al aire, y que es igual á $\frac{4}{3}$, segun la esperiencia de Newton, cuando la luz pasa del aire al agua, como suponemos aquí. Con esta sola alteracion se hallan todos los números de la tabla; y esta conformidad es una nueva prueba muy poderosa de la identidad que hay entre los fenómenos de los colores producidos en las láminas delgadas de agua rodeadas de aire, y los que se forman en las láminas delgadas de aire ó de agua comprendidas entre dos vidrios.

Se observan tambien variaciones análogas en los colores que reflejan las láminas delgadas de vidrios formadas á la lámpara hasta el punto de romperse, y en las hojuelas de la mica adelgazadas estremadamente. Si se colocan estas láminas encima de un fondo negro, y se observa en ellas la reflexion de la luz blanca del cielo bajo diferentes incidencias alzando ó bajando el ojo, se halla que sus colores varían en el mismo sentido que los de las láminas de aire ó de agua cuando se observan los órdenes de anillos que llegan sucesivamente á una misma distáncia de la mancha central, y por consiguiente á un mismo grueso. Pero asi como la marcha y la estension de estas variaciones son mucho menores en las láminas de agua que en las de aire, respecto á iguales variaciones de incidencia, en razon de la gran diferencia de las refracciones que sufren los rayos, del mismo modo son aun un poco menores en el vidrio y en la mica que en las láminas de agua, porque estas sustancias refractan la luz con un poco mas fuerza que el agua. En fin, se observan tam-

bien variaciones semejantes, pero mucho mas débiles y casi insensibles en los colores que aparecen sobre los metales oxidales, particularmente sobre el acero pulido y el cobre cuando se han calentado al aire libre. En efecto, esto debe ser asi, pues en tal caso aquellos metales se cubren de una capita de óxide que teniendo menos accion que el metal puro sobre la luz, segun la poca fuerza refringente que hemos reconocido en el oxígeno, debe producir una reflexion, aunque aplicada á su superficie y por consiguiente hacer ver colores si es suficientemente delgada. Ademas estos colores deben variar muy poco por razon de la incidencia, como producidos por una materia cuya accion sobre la luz es muy enérgica. Se puede tambien, conociendo la relacion de refraccion de la lámina, calcular los límites de estas variaciones, y la observacion se halla perfectamente de acuerdo con este cálculo; y si la relacion de refraccion no es conocida, se puede deducir de esta comparacion y calcular asi el grueso de la lámina delgada que refleja tal ó tal color.

Una identidad tan perfecta de resultados, en sustancias y refracciones tan diferentes, manifiesta hasta la evidencia que el órden de los anillos, su colocacion, y la naturaleza de sus tintas, siguen siempre leyes semejantes en todas especies de láminas. No hay mas diferencia que en el valor absoluto de los gruesos en que se forman, y en la marcha mas ó menos rápida de las variaciones que sufren en virtud de la oblicuidad de incidencia de los rayos de luz. Sus leyes generales nos son, pues, completamente conocidas; pero son leyes compuestas, porque lo son los mismos fenómenos. En efecto, todas las esperiencias que hemos presentado hasta aqui han sido hechas con la luz blanca del sol, que contiene toda especie de rayos diversamente refrangibles, y la variedad de tintas que resultan de ellas en diferentes gruesos manifiesta que la reflexion no se verifica igualmente en cada grueso en todas

las especies de rayos. De manera que para analizar completamente los fenómenos nos es preciso entrar en el exámen de los anillos formados por cada especie de rayo en particular. Luego que conozcamos la ley de estos resultados elementales, podremos deducir de ella los efectos producidos por la mezcla de todos los rayos que componen la luz blanca y recomponen asi el fenómeno despues de haberle descompuesto.

Esto es lo que Newton practicó; volvió á empezar sus esperiencias sobre láminas delgadas de aire contenidas entre dos vidrios, y habiendo dispersado por medio del prisma un rayo de luz blanca para obtener los diversos rayos simples, los hizo caer sucesivamente sobre un papel blanco que los reflejaba á todas partes, y colocó el ojo de modo que pudiese observar el papel colorido por reflexion sobre los vidrios y sobre la lámina de aire intermedia. De este modo descubrió los fenómenos siguientes, cuyas particularidades comprobó con el mayor cuidado, y que referimos casi en los mismos términos que él empleó.

1.º Cada rayo simple producia anillos de su color, ya por reflexion, ya por transmision: los anillos eran enteramente rojos en la luz roja, amarillos en la amarilla, y asi en las demas.

2.º En cada especie de luz los anillos reflejos estaban separados por intervalos obscuros, lo cual les hacia mucho mas distintos que á la luz descubierta, y proporcionaba el poder distinguir un número mucho mayor. Estos anillos se acercaban mas y mas unos á otros, al paso que se separaban de su centro, que formaba el primero y el mas interior de los anillos obscuros.

Obsérvese que Newton no dice que estos anillos intermedios entre los lucidos, vistos por reflexion, fuesen *negros*, sino *obscuros* (*darks*). En efecto, para que hubiera podido verlos negros hubiera sido preciso que la primera y segunda superficie del vi-

drio, situadas á la parte del ojo, no hubiesen reflejado absolutamente ninguna luz. Esta complicacion de reflexion es inevitable, y se verificaria aun cuando se emplease una sola lámina delgada aislada, pues la primera superficie de esta produciria una reflexion parcial, cuyo efecto llegaria al ojo al mismo tiempo que la luz de los anillos. Á la razon toca separar aqui lo que necesariamente reune la esperiencia; pero esta observacion puede dar á conocer la escrupulosa fidelidad que se halla siempre en las esplicaciones de Newton.

3.º Los intervalos obscuros que separaban los anillos luminosos reflejos formaban anillos luminosos cuando se veían por transmision; y entre ellos habia intervalos mas obscuros que correspondian á los puntos en que la luz se reflejaba mas completamente. Pero estos intervalos obscuros no eran negros, porque la reflexion en una lámina de aire está muy lejos de ser total, aun en la parte mas brillante de los anillos reflejos; y lo mismo sucede en todas las láminas delgadas transparentes, como hemos observado antes de ahora.

4. Observando los anillos luminosos reflejos, halló Newton que no formaban simples líneas matemáticas, sino que cada uno de ellos ocupaba cierto espacio circular en que la intensidad de la luz iba degradándose hácia una y otra parte insensiblemente.

5.º Midiendo los diámetros de los anillos reflejos en los puntos mas luminosos de sus órbitas, halló que repecto á cada especie particular de rayos los cuadrados de estos diámetros seguian la progresion aritmética de los números impares 1, 3, 5, 7....; y por consiguiente los gruesos del aire en los perímetros de los anillos sucesivos formaban la misma progresion, puesto que los gruesos son proporcionales á los cuadrados de los diámetros. Cuando los vidrios se hallaban iluminados por la parte mas brillante del espectro que corresponde al límite del

amarillo y el naranjado, el diámetro absoluto del 6.° anillo era, con muy corta diferencia, el mismo que habia hallado en las esperiencias hechas á toda luz, midiéndole en la parte mas brillante del anillo compuesto.

6.° Midiendo igualmente los diámetros de los anillos obscuros comprendidos entre los que acabamos de decir, halló que en cada especie particular de rayos los cuadrados de sus diámetros seguian la progresion aritmética de los números pares 2, 4, 6, 8....; y por consiguiente los gruesos del aire en los perímetros de estos anillos seguian tambien la misma progresion.

7.° Por otras medidas tomadas sobre los anillos refractos halló que sus partes mas brillantes correspondian á los intervalos mas obscuros de los anillos reflejos, y por el contrario sus partes mas obscuras correspondian á las mas brillantes de aquellos. Por consiguiente en los anillos transmitidos los gruesos del aire siguen en las partes mas brillantes la progresion de los números pares 2, 4, 6, 8....; y en los intervalos obscuros la de los números impares 1, 3, 5, 7....

8.° Las dimensiones absolutas de un mismo anillo, ó mas bien de un anillo del mismo órden, eran diferentes en los diversos colores. Asi, el diámetro esterior del quinto anillo, por ejemplo, cuando se hallaba formado por los primeros grados del rojo estremo, era mayor que el del mismo anillo formado por los rayos que componen el medio del rojo; este último era mayor que el del anillo formado por los primeros rayos del naranjado, y asi sucesivamente, siguiendo el órden de refrangibilidad de los colores hasta el violado que formaba los anillos mas pequeños. El ancho de los anillos en su perímetro, es decir, la estension ocupada por todos los grados de su luz, variaba igualmente segun los diferentes colores; y era mayor en los rayos rojos, menor en los naranjados, y asi sucesivamen-

te hasta el violado, en que era el mas pequeño de todos.

9.° Los anillos simples formados por cada color eran los mas pequeños posibles cuando los rayos atravesaban perpendicularmente la lámina de aire, y crecian al paso que la incidencia se hacia mas oblicua, conforme á la ley que hemos espuesto anteriormente.

Las observaciones que preceden esplican completamente el fenómeno compuesto que presentan los anillos formados por la luz natural; porque no siendo esta mas que una mezcla de rayos de diferentes colores en proporciones determinadas, cuando un hacecillo de una mezcla semejante viene á caer sobre la lámina delgada de aire interpuesta entre los vidrios, cada rayo simple debe formar anillos, segun las leyes que le son propias, y como es diferente el tamaño absoluto de estos anillos en los rayos de distintos colores, debe resultar entre ellos una separacion que permita destinguirlos. Esta separacion no será tan clara como en las esperiencias hechas con rayos simples, porque los anillos de diferentes colores deben sobreponerse en parte de una manera que puede ser diferente en las diversas sucesiones de anillos, y producir asi la infinidad de tintas diferentes que nos ha hecho ver la esperiencia. Pero aunque esta sobreposicion de los anillos simples sea en efecto la llave de los fenómenos, no podemos estar seguros de esta verdad sino despues de haber medido con exactitud el tamaño absoluto de los diámetros y anchos de estos anillos, formados por los distintos colores; pues conocidos estos resultados, deberá ser un simple problema de aritmética hallar la especie y cantidad de cada color simple que puede reflejarse ó transmitirse en cada grueso determinado; y por consiguiente, si calculamos los efectos de la composicion de todos los colores por las reglas dadas en la primera parte de la óptica, deberemos deducir con el mayor

rigor las espresiones numéricas de las intensidades y de las tintas que deben existir en cada uno de los anillos compuestos, consecuencia que despues podremos ocupar fácilmente con la esperiencia. En una palabra, hemos llegado á entrever y aun á reconocer una causa posible de los fenómenos que examinaremos; mas ahora necesitamos de medidas exactas para comprobar su exactitud y convertir nuestras sospechas en seguridad.

Con este objeto Newton midió los diámetros de los anillos simples *del mismo órden* en la parte interior y esterior de su perímetro considerándolos sucesivamente en los límites de los diferentes colores del espectro, empezando per el violado estremo. Segun su método constante tuvo cuidado de unir estos resultados por una ley matemática que los representase con bastante exactitud. Despues, comparando los cuadrados de los diámetros, dedujo las proporciones de grueso que debia tener la lámina de aire al principio y al fin de los anillos observados. Tales medidas, tomadas en diferentes órdenes de anillos formados por un mismo color simple, le hicieron conocer que los intervalos de grueso en que se verificaba la reflexion igualaban sensiblemente á aquellos en que se verificaba la transmision, de suerte que designando en general por e_1 el grueso del aire al principio del primer anillo lucido formado por una luz simple cualquiera, este anillo acababa en el grueso e_2, y ocupaba asi un intervalo de grueso igual á $2e_1$. En seguida venia el primer anillo obscuro ocupando el mismo intervalo de grueso $2e_1$, y á continuacion el segundo anillo lucido que empezaba en el grueso $3e_1$ y acababa en $5e_1$, y asi sucesivamente. Combinando esta ley de sucesion de los diferentes órdenes con la de la distribucion de las diversas tintas en un mismo órden, se ve que un solo grueso absoluto, medido al principio, al medio ó al fin de un anillo cualquiera, formado por un color simple, basta

para poder calcular el valor del primer grueso e_1 relativamente á este color, asi como á todos los demas, y deducir de él los gruesos $3e_1$ $5e_1$ $7e_1$ de los límites relativamente á todos los órdenes de anillos. Se puede emplear para esto el valor exactísimo, obtenido por Newton, del grueso del aire en el medio del primer anillo lucido formado por los rayos límites del amarillo y el naranjado, grueso que hemos visto que es igual á $\frac{1}{178000}$ de pulgada inglesa, ó $\frac{1000}{178}$ tomando por unidad el millonésimo de pulgada. Este será el valor de $2e_1$ respecto á este color, y por consiguiente e_1 será $\frac{500}{178}$ ó 2,80899. Sobre este dato fundamental, combinado con las relaciones halladas entre los diferentes colores, está formada la tabla siguiente en que e_n E_n denotan los gruesos en que empieza y acaba el anillo del órden *n*.

Tabla de los gruesos de aire á que empiezan y acaban los diferentes anillos espresados en millonésimas de pulgada inglesa.

Espresiones generales de los gruesos e_n E_n en que empieza y acaba cada anillo del órden *n*.	Violado estremo.	Límite del violado y el azul obscuro.	Límite del azul obscuro y el azul claro.	Límite del azul claro y el verde.	Límite del verde y el amarillo.	Límite del amarillo y el naranjado.	Límite del naranjado y el rojo.	Rojo estremo.
Primer anillo e_1	1,99849	2,16154	2,25671	2.42071	2,61866	2,80899	2,93207	3,172206
$E_1 = 3\,e_1$	5,99547	6,48462	6,77013	7,26213	7,85598	8,42697	8,79621	9,516618
Segundo anillo $e_2 = 5\,e_1$	9,99245	10,80770	11,28355	12,10355	13,09330	14,04495	14,66035	15,861030
$E_2 = 7\,e_1$	13,98943	15,13078	15,79697	16,94497	18,33062	19,66293	20,52449	22,205442
Tercer anillo $e_3 = 9\,e_1$	17,98641	19,45386	20,31039	21,78639	23,56794	25,28091	26,38863	28,549854
$E_3 = 11\,e_1$	21,98339	23,77694	24,82381	26,62781	28,80526	30,89889	32,25277	34.894266
Cuarto anillo $e_4 = 13\,e_1$	25,98037	28,10002	29,33723	31,46923	34,04258	36,51687	38,11691	41,238678
$E_4 = 15\,e_1$	29,97735	32,42310	33,85065	36,31065	39,27990	42,13485	43,98105	47.583090
Quinto anillo $e_5 = 17\,e_1$	32,97433	36,74618	38,36407	41,15207	44,51722	47,75283	49,84519	53,927502
$E_5 = 19\,e_1$	37,97131	41,06926	42,87749	45,99349	49,75454	53,37081	55,70023	60,271914
Sesto anillo $e_6 = 21\,e_1$	41,96829	45,39234	47,39091	50,83491	54,99186	58,98879	61,57347	66,616326
$E_6 = 23\,e_1$	45,96527	49,71542	51,90433	55,67633	60,22918	64,60677	67,43761	72,960738
Septimo anillo $e_7 = 25\,e_1$	49,96225	54,03850	56,41775	60,51775	65,46650	70,22475	73,30175	79,305150
$E_7 = 27\,e_1$	53,96923	58,36158	60,93117	65,35917	70,70382	75,84273	79,16589	85,649562

Los resultados de esta tabla pueden representarse por medio de una construccion geométrica que proporciona el abrazarlos todos de un golpe de vista, y vamos á esplicarla tal como la ha dado Newton.

Observemos primero que las series de las cantidades e_1 E_1, e_2 E_2, e_3 E_3.... en cada color, forma una progresion aritmética e_1, $3e_1$, $5e_1$, $7e_1$.... cuya diferencia es $2e_1$, y que sigue el órden de los números impares. Si queremos representar geométricamente este resultado, no hay mas que dividir una recta indefinida ZZ′, fig. 7, en un número cualquiera de partes iguales entre sí á e_1, y despues marcar los puntos de divison sucesivos por los números 1, 2, 3, 4, 5, 6...... En este caso desde el grueso o hasta el grueso $21 = e_1$ serán transmitidos los rayos de este color, y se reflejarán desde el grueso 21 hasta el grueso Z3; desde Z3 hasta Z5 volverán á transmitirse de nuevo, y asi alternativamente se reflejarán ó se transmitirán en toda la estension de la recta ZZ′. El máximum de reflexion se verificará en los gruesos Z2, Z6, Z10, que siguen la progresion de los números impares 1, 3, 5, 7.... y el máximum de transmision en los gruesos Z4, Z8, Z12 que siguen la progresion aritmética de los números pares 0, 2, 4, 6, 8....; de suerte que si se quiere conocer el efecto producido por un grueso cualquiera dado y representado por ZX, no habrá mas que colocar esta longitud sobre la recta ZZ′ contando desde el punto Z; y el punto de ella en que caiga X manifestará si da lugar á la transmision ó á la reflexion, y á cual órden de anillos pertenece.

Pero esta construccion sobre una sola línea recta no es aplicable sino á los rayos de un solo color, y aun á los de este color que corresponden á un sitio determinado del espectro. Para generalizarla basta observar que los valores de e_n y E_n respecto á los diferentes colores cuando el valor de n es uno mismo son proporcionales á los valores de e_1 que

corresponden á estos colores, y por consiguiente se pueden representar por las ordenadas de una línea recta, cuyas abscisas fuesen e_1. Tal es el objeto de la construccion siguiente propuesta por Newton.

Sobre un eje indefinido CZR, fig. 8, tómense desde un punto cualquiera C las abscisas CZ, CU, CI, CB, CV, CJ, CO, CR, proporcionales á los números 0,63000, 0,6814, 0,7114, 0,7631, 0,8255, 0,8855, 0,9243, 1, que conforme á la esperiencia espresan las relaciones de los diferentes valores de e_1 en los límites de los siete colores principales del espectro. Despues por los puntos Z, U, I...., R, estremo de estas abscisas, levántense perpendicularmente al eje CZR las ordenadas indefinidas ZZ′, UU′, RR′, y tomando sobre la primera una parte Z1 igual al valor de e_1 respecto á los últimos rayos del espectro que confinan con el negro, señálense con este intervalo los puntos 2, 3, 4, 5.... de la misma ordenada, y tírense al punto C las líneas de puntos C1, C3, C5, que pasan por todas las divisiones impares. Las intersecciones de estas rectas con las ordenadas relativas á cada color determinarán los valores de e_n y E_n en que la reflexion de este color empieza y acaba en cada órden de anillos. Asi los espacios 11′, 33′, 55′, 77′...., comprendidos entre C1 y C3, C3 y C7...., indican los intervalos de grueso en que se verifica cada reflexion, y los espacios intermedios 00′, 11′, 33′, 55.... indican los intervalos en que la luz incidente se transmite en su totalidad. En fin, los trapecios comprendidos en estos espacios por las ordenadas que limitan las siete divisiones del espectro indican en particular los intervalos de grueso propios para la reflexion ó transmision de todos los grados de luz simple que producen la sensacion de cada color. Por ejemplo, los trapecios comprendidos entre las ordenadas ZZ′ y UU′ comprenden todos los grados del violado; los comprendidos entre UU′ y II′ contienen todos los grados del azul obscuro, y asi de

los demas. Pero es preciso unir á estas limitaciones geométricas una limitacion importante, á saber, que la transmision es total en los sitios en que está indicada, mientras que la reflexion insensible en los límites en que empieza crece hasta cierto máximum indicado por las líneas medias C2, C6, C10...., desde donde empieza á debilitarse de nuevo por los mismos grados, y aun en estos gruesos donde es mas enérgica no deja de ser parcial. Tambien debemos observar que los intervalos de grueso que corresponden á la reflexion son en la naturaleza siempre un poco mayores que los que corresponden de la transmision, sobre todo en los primeros órdenes de anillos; pero Newton á que ha observado bien esta diferencia, la ha creido demasiado pequeña y poco susceptible de una valuacion exacta para poder contar con ella.

Aunque al construir esta figura, asi como la tabla que representa, no hemos tenido otro objeto que la reflexion de los colores en las láminas delgadas de aire, una y otra son aplicables á láminas de cualquiera naturaleza, puesto que hemos reconocido que en todas las sustancias la formacion de los anillos sigue unas mismas leyes. No hay mas diferencia que en los valores absolutos de e_1 en que se forman, los cuales son tanto menores cuanto mas refringente es la sustancia. Podemos, pues, mirar como generales las consecuencias de nuestra construccion con esta modificacion únicamente.

Por medio de ella se verá inmediatamente si tal ó tal color se refleja ó transmite en un grueso dado; porque representando este grueso por ZX, no hay mas que tomar esta parte de la ordenada ZZ′ y tirar por el punto X en que termina la línea XX′ paralela al eje CZR, y examinar si esta paralela atraviesa uno de los espacios propios para la reflexion ó la transmision de aquel color. Del mismo modo si se preguntase qué especies de colores pueden transmitirse ó reflejarse en este grueso

ZX, no habia mas que observar si hay partes de esta línea que atraviesen los espacios oo′, 11′, 33′, 55...., en que se verifica la transmision pues, estas partes indicarán realmente que los colores se transmiten; y por el contrario, donde pasen por los espacios intermedios 11′, 33′, 55′, 77′, indicarán una reflexion que será tanto mas abundante cuanto mas se acerque la línea XX′ á cortar estos espacios por su centro, en que se hallan atravesados por las líneas medias C2, C6, C10..... Supongamos, por ejemplo, que se pregunta qué especie de verde aparecerá por reflexion en el tercer anillo en el sitio en que es mas viva la reflexion de este color, se marcará en la línea transversal 10, 10′ el medio del trapecio que corresponden al verde, y tirando por este punto una paralela *vmv′* á CZR, se hallará que pasa por el estremo inferior del espacio correspondiente al amarillo, y por el estremo superior del que denota el azul en este mismo anillo; en todo el resto la línea *vmv′* pasará por espacios que indican la transmision, de donde se inferirá que la especie de verde que se refleje en este grueso se compondrá principalmente de verde simple, mezclado con un poco de azul y amarillo, lo cual constituirá todavia un buen verde.

Tambien podemos por medio de esta figura esplicar en todos sus pormenores el fenómeno de los anillos de color formados por la luz natural refleja en una lámina delgada de aire ó de cualquiera otra sustancia; porque penetrando en la lámina con una misma incidencia todos los rayos simples que componen esta luz, cada uno de ellos debe formar sus anillos con areglo á sus propias leyes, y la segunda superficie de la lámina debe reflejarlos ó transmitirlos en los mismos gruesos en que los hubiera reflejado ó transmitido si la hubiesen atravesado, aislado ó sucesivamente. Supuesto, pues, que un mismo grueso puede reflejar separadamente los rayos de diferentes especies, como acabamos de ver,

los reflejará tambien simultáneamente mientras que dejará pasar los que correspondan. De donde resulta que si la lámina delgada tiene por todas partes un mismo grueso, reflejará en todos sus puntos una misma mezcla de rayos en cada oblicuidad dada, y por lo mismo si se la observa desde una distancia suficiente para que sean sensiblemente paralelos los rayos que envia al ojo desde sus diversos puntos, aparecerá de un color uniforme. Pero si el grueso varía, los colores variarán tambien en los diferentes puntos de la lámina, con arreglo á los gruesos. Asi, cuando la lámina esté comprendida entre los objetivos esféricos, cuyo intervalo irá siempre aumentando desde el punto de contacto, deberán formarse al rededor de este punto una infinidad de anillos circulares de diferentes tintas, como en efecto se observa en los anillos producidos por la luz del dia.

Tambien podemos determinar el órden en que se suceden los colores de estos anillos partiendo de su centro comun. Para esto basta concebir una línea recta que coincidiendo en su orígen con ZCR, se separe de ella poco á poco, siempre paralelamente, y se mueva asi atravesando todos los espacios en que alternativamente se verifica la reflexion ó la transmision. Al principio, cuando esta línea se separe de CZR, empezará atravesando un espacio en que no se verifica sino muy poca ó ninguna reflexion, á causa de la estrema tenuidad de las láminas, y en seguida llegará á 1, es decir, á los mas débiles principios del violado estremo; pero al momento que haya entrado un poco en el espacio que pertenece á este color, encontrará tambien los que corresponden al azul y al verde, los cuales con el violado compondrán un azul; y despues penetrará en el amarillo y el rojo, que mezclados con este azul compondrán un blanco. Segun la poca inclinacion de la línea $C\,1\,1'$ con el eje CZR, se ve que este paso á la blancura deberá verificarse

siempre con una gran rapidez En las láminas de aire, por ejemplo, el principio del violado en el primer anillo corresponde al grueso 1,99849, segun manifiesta la tabla; y el principio del rojo en este mismo anillo, hallándose en el límite del rojo y el naranjado, corresponde al grueso 2,93207, de donde se sigue que la separacion de los colores no se verifica sino en un intervalo de grueso igual á 2,93207—1,99849, ó 0,99358, y por consiguiente debe ser muy dificil de reconocer, á menos que los gruesos no varíen con una estrema lentitud. Formado el blanco en el primer anillo, continuará reflejándose mas ó menos perfectamente en tanto que la línea movible pase desde 1 hasta 3; y despues, faltando sucesivamente los colores que le componen, se cambiará primero en un amarillo compuesto, y despues en un rojo que desaparecerá al llegar á 3′. Entonces empiezan los colores del segundo anillo, y entre estos y los del primero hay un pequeño intervalo negro, á lo menos adoptando como rigorosos los límites de reflexion fijados por Newton, porque el grueso estremo en que *acaba* el rojo del primer anillo, segun nuestra tabla, es 9,516618, y el grueso en que empieza el violado del segundo anillo es 9,99245, de donde se sigue que entre estos dos límites hay un intervalo igual á 9,99245—9,516618, ó 0,475832, en que no se refleja ningun color; y por consiguiente deberá formarse por transmision un anillo blanco muy delgado en este sitio. Pero la existencia de estos dos anillos podrá modificarse por la estension mas ó menos considerable de los límites de la reflexion; porque si la lámina delgada de aire sobre que se han tomado los límites anteriores se hiciese de repente un poco mas reflejante sin alterarase, en nada sus demas propiedades, podrian observarse cantidades de luz sensibles, en los mismos sitios en que antes no se percibian absolutamente; los intervalos de grueso ocupados por los anillos reflejos lu-

cidos se harán mas considerables, y los dos primeros anillos podrán ensancharse lo suficiente para hacer desaparecer el pequeño anillo negro que los separaba en las determinaciones de Newton. En efecto, mas adelante hallaremos sustancias que nos ofrecerán esta sobreposicion de un modo bastante distinto para poder observar, no en el fenómeno mismo de los anillos, sino en otra serie de hechos que sigue absolutamente las mismas leyes de periodicidad en una escala de gruesos mucho mas dilatada. Como quiera que sea, volviendo á las esperiencias de Newton vemos que pasado el anillito negro cuya existencia acabamos de reconocer, empiezan los colores del segundo anillo que se suceden por órden, mientras la línea movible pasa de 5 á 7; y estos son mas vivos que los del primer anillo, porque estan mas dilatados y separados unos de otros, como indica la misma figura, por la mayor inclinacion de la línea 77′ con el eje CZR. En virtud de esta separacion se interpone entre el azul y el amarillo de este anillo, no ya blanco, como en el primero, sino una mezcla de naranjado, amarillo, verde, azul claro y azul obscuro, cuyos colores unidos deben componer un verde bajo é imperfecto. Del mismo modo se suceden por órden los colores del tercer anillo; primero viene el violado, que se mezcla un poco con el rojo del segundo órden, porque aquel empieza en el grueso 17,98641, y acaba en 21,98339, en vez de que el rojo del segundo órden no acaba hasta 22,205442, de donde se sigue que estos dos colores se reflejan juntos en toda la estension del violado del último anillo, y esta es la razon porque este violado no se percibe separadamente, y se cambia en un color de púrpura rojizo. En seguida vienen el azul y el verde, que estan menos mezclados con otros colores, y por lo mismo son mas vivos que antes, sobre todo el verde; despues sigue el amarillo, una gran parte del cual del lado del verde es claro y bueno, mientras

la otra parte al lado del rojo que viene inmediatamente despues, forma un amarillo, que asi como el rojo se halla mezclado con el violado y el azul del cuarto anillo, de donde resultan diferentes grados de un rojo purpúreo. Este violado y azul, que deberian seguir al rojo, se hallan mezclados y confundidos con él, de donde resulta que en vez de ellos sucede un verde, que al principio tira á azul, pero que en seguida toma un color muy bueno, y es el único color vivo y su mezcla que aparece en este cuarto anillo, pues al paso que se inclina al amarillo, empieza á mezclarse con los colores del quinto, por cuya mezcla el anillo y el rojo, que vienen inmediatamente despues, son muy débiles y sucios, sobre todo el amarillo, que siendo el color mas débil, apénas puede percibirse. Despues los diferentes anillos y colores se mezclan y se confunden mas y mas, hasta que despues de tres ó cuatro series en que dominan el rojo y el azul, hallándose mezcladas con bastante igualdad todas las especies de colores, componen un blanco uniforme.

Como hemos observado que los rayos de un color se transmiten en el mismo sitio en que se reflejan los de otro, se ve que tomando el complemento de los colores reflejos, cuya sucesion acabamos de presentar, se tendrá el órden y sucesion de los colores transmitidos. Asi, haciendo mover la línea movible paralelamente á CR desde 2 hasta 1, hemos hallado que en este espacio la reflexion era nula ó insensible; luego la transmision será total, y esto producirá la mancha blanca central que se observa en los anillos transmitidos. Llegando la línea movible á 1, los rayos violados y azules empezarán á reflejarse, y por consiguiente su complemento formará en los anillos transmitidos un blanco amarillento, y en seguida un rojo amarillento, pero estos colores serán muy débiles y difíciles de distinguir, porque los primeros rayos violados no se reflejan en grande abundancia á causa de la distancia á que se

halla la regla de 22′; y cuando empieza á acercarse llega casi al momento en 1′ al principio del rojo; de suerte que perdiendo asi la luz blanca transmitida una parte de todos sus colores y en una proporcion poco diferente de la que produce la blancura, queda blanca como antes, ó á lo menos solo sufre una coloracion muy poco marcada. Pero al mismo tiempo se debilita su intensidad, y es la menor posible en los gruesos en que es mas viva la reflexion que corresponde al medio del blanco en los anillos reflejos. Esta es la causa del anillo negro, ó mas bien gris obscuro, que sigue al rojo amarillento en los anillos vistos por transmision.

Separándose siempre la línea movible del eje CR llega á 3, y entonces los rayos violados empiezan á sustraerse enteramente á la reflexion, en seguida los azules, los verdes, los amarillos, y últimamente los rojos, pero como la línea 33′ se halla un poco inclinada sobre ZR, sucede aqui lo mismo que en el paso de la línea de 1 á 1′, es decir, que no se puede distinguir la sucesion de estos diferentes colores en razon de la poca diferencia de los gruesos que los producen, y tambien por causa de su debilidad; de suerte que todo lo mas que se distingue es un poco de violado y azul que al momento se cambia en blanco, cuando la regla llega á 3′, pues hemos visto que entonces no llega aun á 5, porque 25 es mayor que R3′ una cantidad igual á 0,479832 millonésimas de pulgada, lo cual produce por transmision el segundo anillo blanco el cual subsiste en tanto que la línea movible pasa de 3′ á 5. Empezando entonces á verificarse la reflexion de los colores del segundo anillo, se separan sucesivamente de este blanco las diferentes partes que le componen; primero el violado, despues el violado y el azul, en seguida el violado, el azul y el verde, y asi sucesivamente, lo cual le cambia en los colores complementarios de los anteriores, es decir, en amarillo, rojo, violado y azul. Estos son los colores

del segundo anillo transmitido, y son mas visibles que los del primero, porque la línea que los limita es mas oblicua respecto á CR que II′, lo cual los separa mas unos de otros. Continuando asi separándose de CR, y tomando siempre el color complementario del anillo reflejo, se hallarán sucesivamente los colores de los anillos transmitidos en el órden que hemos indicado antes con arreglo á la observacion.

Segun este exámen se puede concebir por qué los anillos transmitidos son siempre mucho mas pálidos que los anillos reflejos. Esto consiste en que en la transmision, los anillos formados por cada especie de luz simple no se hallan separados por intervalos negros, puesto que jamás es total la reflexion en ningun punto de la lámina, de suerte que su sucesion no presenta sino alternativas de intensidad periódicamente crecientes y decrecientes, en vez que los anillos simples, vistos por reflexion, estan separados entre sí por intervalos absolutamente negros, lo cual les impide el introducirse tanto unos en otros cuando se reflejan todos al mismo tiempo. Por esta razon los anillos transmitidos deben ser mas distintos si se aumenta el poder reflejante de la lámina; porque las variaciones de intensidad serán mas considerables en las diferentes partes de los anillos simples que los componen, lo que hará menos uniforme su mezcla. Esto sucede cuando se inclinan mucho los rayos sobre la lámina delgada mirándola muy oblicuamente, pues entonces llega á ser la reflexion hasta quince ó veinte veces mayor que bajo la incidencia perpendicular. Asi es que entonces se observa que los colores de los anillos transmitidos se hacen mucho mas sensibles que antes; y por el contrario lo son menos los de los anillos reflejos, porque se ensanchan los anillos simples que los componen, y se introducen mas unos en otros.

Todas estas indicaciones de la teoría se pueden comprobar con la mayor facilidad observando los

colores que se presentan en las bolas de agua de jabon, tanto por reflexion como por transmision; pero para poder estudiar todos sus pormenores es necesario formar estas bolas como hemos esplicado antes, soplándolas en un vaso cerrado y dejándolas colgar al estremo del tubo con que se han formado; porque dejándolas subsistir horas enteras, esta disposicion les permite pasar sucesivamente por todas las variedades de grueso y todas las diferencias de coloracion. Aun se puede mejorar el método soplando una sobre otra dos bolas separadas por una lámina de agua muy delgada, como representa la fig. 9. Para esto, despues de haber formado la primera bola, se pone con el dedo en el orificio superior del tubo una gotita de agua que al momento baja hasta el otro orificio; se sopla esta agua suavemente, y resulta una segunda bola adherente á la primera. El tabique acuoso que los separa es ordinariamente casi plano, y mas ó menos inclinado al horizonte; oblicuidad que produciendo la caida del agua que la forma, adelgaza esta pared cada vez mas, sobre todo en la parte mas elevada. De aqui resulta una sucesion de bandas anchas de colores con todas las tintas de los anillos, que pareciendo primero en la parte superior de la lámina, bajan gradualmente hácia la inferior, desarrollando cada vez mas la riqueza de sus tintas; y en su formacion sucesiva, asi como en sus diferentes alteraciones, presentan todas las variedades de coloracion que la teoría acaba de indicarnos.

Hasta aqui no hemos considerado sino el órden y la especie de los colores simples que se reflejan ó transmiten en cada grueso. Para recomponer plenamente el fenómeno es necesario determinar la naturaleza de las tintas que resultan de estas mezclas; lo cual exige que se conozca la ley con que varía la intensidad de la reflexion en la estension de cada anillo simple, porque conocidas estas intensidades, la composicion de los colores puede deducirse por

el método esplicado en el capítulo primero de esta parte. Tambien se podrian señalar con exactitud los gruesos en que deben aparecer las tintas mas marcadas de cada anillo. Asi lo ha hecho Newton, y ha compuesto una tabla de sus resultados respecto á los siete órdenes de anillos cuya coloracion es sensible. Aqui la presentamos tal como él la da. Solo sí advertiremos que habiendo calculado al principio, únicamente para las láminas de aire, la estendió despues á las de agua y de vidrio, segun la observacion hecha antes de que en las diferentes sustancias se reflejan una misma tinta en gruseos recíprocamente proporcionales á la relacion de refraccion. De suerte que si esta relacion es $\frac{3}{4}$ respecto á los rayos que pasan del aire al agua, las láminas de agua que reflejan cierta tinta deberán tener los $\frac{3}{4}$ del grueso que tendrian las de aire para reflejarla. Esta relacion se puede observar en la tabla de Newton, y algunas esperiencias que presentaremos mas adelante prueban la generalidad de la regla.

	COLORES REFLEJOS.	Gruesos de las láminas en millonésimas de pulgada inglesa. de aire	de agua	de vidrio.
Orden 1.°	Muy negro.	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{10}{31}$
	Negro.	1	$\frac{3}{4}$	$\frac{20}{31}$
	Principio del negro.	2	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{2}{7}$
	Azul	$2\frac{2}{5}$	$1\frac{4}{5}$	$1\frac{11}{20}$
	Blanco	$5\frac{1}{4}$	$2\frac{7}{8}$	$3\frac{2}{5}$
	Amarillo	$7\frac{1}{9}$	$5\frac{1}{3}$	$4\frac{3}{5}$
	Naranjado	8	6	$5\frac{1}{6}$
	Rojo	9	$6\frac{3}{4}$	$5\frac{4}{5}$
Orden 2.°	Violado.	$11\frac{1}{6}$	$8\frac{3}{8}$	$7\frac{1}{5}$
	Azul obscuro. . . .	$12\frac{5}{6}$	$9\frac{5}{8}$	$8\frac{2}{11}$
	Azul claro	14	$10\frac{1}{2}$	9
	Verde.	$15\frac{1}{8}$	$11\frac{1}{3}$	$9\frac{5}{7}$
	Amarillo	$16\frac{2}{7}$	$12\frac{1}{5}$	$10\frac{2}{5}$
	Naranjado	$17\frac{2}{9}$	13	$11\frac{1}{9}$
	Rojo brillante . . .	$18\frac{1}{3}$	$13\frac{3}{4}$	$11\frac{5}{6}$
	Rojo punzó.	$19\frac{2}{3}$	$14\frac{3}{4}$	$12\frac{2}{3}$
Orden 3.°	Púrpura	21	$15\frac{3}{4}$	$13\frac{11}{20}$
	Azul obscuro. . . .	$22\frac{4}{10}$	$16\frac{4}{7}$	$14\frac{1}{4}$
	Azul claro	$23\frac{2}{5}$	$17\frac{11}{20}$	$15\frac{1}{10}$
	Verde.	$25\frac{1}{5}$	$18\frac{9}{10}$	$16\frac{1}{4}$
	Amarillo	$27\frac{1}{7}$	$20\frac{1}{3}$	$17\frac{1}{2}$
	Rojo	29	$21\frac{3}{4}$	$18\frac{5}{7}$
	Rojo azulado. . . .	32	24	$20\frac{2}{3}$
Orden 4.°	Verde azulado . . .	34	$25\frac{1}{2}$	22
	Verde.	$35\frac{2}{7}$	$26\frac{1}{2}$	$22\frac{3}{4}$
	Verde amarillento.	36	27	$23\frac{2}{9}$
	Rojo.	$40\frac{1}{3}$	$30\frac{1}{4}$	26
Orden 5.°	Azul verdoso. . . .	46	$34\frac{1}{2}$	$29\frac{2}{3}$
	Rojo.	$52\frac{1}{2}$	$39\frac{3}{8}$	34
Orden 6.°	Azul verdoso. . . .	$58\frac{3}{4}$	44	38
	Rojo.	65	$48\frac{3}{4}$	42
Orden 7.°	Azul verdoso. . . .	71	$53\frac{1}{4}$	$45\frac{4}{5}$
	Blanco rojizo. . . .	77	$57\frac{3}{4}$	$49\frac{2}{3}$

Comparando esta tabla con la fig. 8, el modo con que está compuesto cada color de los que comprende en funcion de sus elementos simples tiene tambien otros muchos usos que esplicaremos mas adelante; pero hay algunos que podemos esplicar desde ahora.

El primero y mas sencillo es hallar el grueso de una lámina delgada, dado el color que refleja bajo la incidencia perpendicular y conocida su relacion de refraccion. En efecto, conocido el color, la tabla determina el grueso de aire que le corresponde, el cual, dividido por la relacion de refraccion de la sustancia, da el grueso de esta. Por ejemplo, conforme á las esperiencias que indicaremos muy pronto, la relacion de refraccion de la mica puede valuarse en 1,53 siendo 1 la del aire. Supongamos que se deprende una hojita de esta sustancia suficientemente delgada para que pueda reflejar el azul claro del tercer órden bajo la incidencia perpendicular. Siendo 23,4 el grueso de la lámina de aire que reflejaria este color, segun la tabla de Newton, el de la lámina de mica será $\frac{23,4}{1,53}$ ó 15,3, es decir, ciento cincuenta y tres diez millonésimas de pulgada inglesa; grueso que se diferencia muy poco del que tendria una lámina de vidrio que reflejase el mismo color, lo cual proviene de la cortísima diferencia que existe entre las relaciones de refraccion de la mica y del vidrio.

Otro uso de la lámina es el de determinar á la vez la relacion de refraccion de las láminas con su grueso, cuando se han observado las tintas que reflejan bajo dos incidencias conocidas; por ejemplo, cuando los rayos incidentes son paralelos ó perpendiculares á su superficie, para lo cual no hay mas que combinar las indicaciones de la tabla con la ley general dada por Newton respecto á las variaciones de las tintas bajo diversas incidencias. Nós falta sin embargo decir cómo se reconoce que la tinta observada es de tal ó tal órden, y esto lo esplicaremos mas adelante.

La teoría de los anillos de color que acabamos de esplicar siguiendo á Newton no hace conocer la causa fisica que produce la descomposicion de la luz en las láminas muy delgadas de los cuerpos; pero admitida esta descomposicion como un hecho, reduce este á sus elementos mas sencillos, manifiesta por qué se sobreponen los anillos de diferentes colores, señala las leyes de esta sobreposicion, y deduce toda la diversidad de tintas que resultan de esta mezcla. Estas propiedades, combinadas con las otras leyes de óptica, es decir, con las de la refraccion y reflexion, deben necesariamente bastar; y bastan en efecto para esplicar completamente todas las modificaciones que pueden esperimentar las tintas de los anillos cuando se les ha hecho sufrir la accion refringente ó reflejante de los cuerpos. Si algunos fenómenos nuevamente descubiertos se ha creido que se sustraían á estas leyes, es porque no se han distinguido bastante las causas que modifican la intensidad de la luz, y las causas que producen su descomposicion en anillos. Esta distincion es muy importante, porque ya hemos observado qué se puede debilitar la intensidad de los anillos sin alterar la naturaleza de sus tintas, y mas adelante veremos que se pueden debilitar hasta el punto de hacerlas desaparecer rigorosa y completísimamente. Pero estos fenómenos no debilitan las leyes que acabamos de establecer sobre la formacion de los anillos, porque únicamente son relativas al modo de separacion y de distribucion de los colores, y no á la cantidad absoluta de luz refleja, la cual puede variar por causas absolutamente estrañas é indiferentes á estas leyes.

Newton, queriendo comprobar sus descubrimientos sobre los anillos por medio de todas las pruebas posibles, refiere en su obra un gran número de hechos, al parecer muy estravagantes, que analizados por su teoría, se esplican con la mayor facilidad. No trataremos de seguirle en to-

dos sus pormenores, pues nos bastará haber hecho ver que todas las esperiencias relativas únicamente á la combinacion de las tintas están comprendidas en su teoría; mas sin embargo, presentamos dos de sus esperiencias, porque encierran, por decirlo asi, la reunion de todos los hechos que comprende la teoría, y manifiestan cómo debe esta aplicarse.

Cuando se forman anillos de colores entre las superficies de dos prismas sobrepuestos, como manifiesta la fig. 10, si se hacen girar los prismas al rededor de su arista comun y perpendicularmente al plano ACB de modo que se hagan los rayos incidentes mas oblicuos sobre la lámina de aire, se ven ensancharse mas y mas los anillos al rededor de la mancha central, como debe suceder puesto que aumenta la oblicuidad de la incidencia de los rayos sobre la lámina de aire BC. Ahora bien, si la longitud del plano CB permite seguirlos asi hasta la reflexion total, acaban por desaparecer enteramente; pero observándolos cuidadosamente mientras las mudanzas de inclinacion, se ve que varían sus tintas, las cuales se acercan poco á poco unas á otras en cada anillo, de modo que estan menos marcadas; y se llega á un término en que los colores han desaparecido enteramente, y no se ven mas que anillos blancos muy desunidos separados por anillos negros. En fin, continuando siempre el movimiento de los prismas en el mismo sentido, estos anillos blancos se resuelven de nuevo en anillos de colores; pero el modo con que estos se presentan es contrario al que tenian en las incidencias inmediatas á la perpendicular, es decir, que el violado y el azul salen los primeros en el perímetro esterior de cada anillo, en vez de ser los mas interiores como al principio: y por el contrario, el rojo es el mas interior, siendo asi que antes formaba el borde esterior del anillo; en una palabra, el órden de los colores es absolutamente inverso.

Todo esto es una consecuencia necesaria de la teoría. Hemos visto que con una misma incidencia los rayos rojos forman anillos mayores que los naranjados, estos mayores que los amarillos, y asi sucesivamente hasta los violados, que forman anillos mas pequeños. Cuando los rayos incidentes caen, pues, perpendicularmente sobre la lámina de aire, los anillos rojos deben ser en cada órden los mas esteriores, en seguida los naranjados, los amarillos...., y en fin, los violados, que forman el borde interior de cada sucesion. Si todos los rayos se inclinasen igualmente sobre la lámina de aire, subsistiria igualmente el mismo órden, porque los anillos de diferentes colores bajo una misma inclinacion se dilatan proporcionalmente al cuadrado de su diámetro primitivo, y asi no hacen mas que estenderse en vez de concentrarse. Esto sucede, por ejemplo, cuando se observan los anillos formados entre dos vidrios objetivos, cuyo grueso y convexidad son de poca consideracion, pues entonces los rayos emergentes sobre la lámina de aire son siempre casi paralelos á los rayos incidentes, y por consiguiente entre sí. Pero cuando los rayos incidentes antes de llegar á la lámina de aire atraviesan las dos superficies de un prisma, como en la esperiencia de que tratamos, se refractan y dispersan por el prisma antes de llegar á la lámina; y lo son desigualmente á causa de su distinta refrangibilidad, de donde resultan diferentes incidencias.

Sea SI, fig. 11, el rayo incidente, IN la perpendicular á la superficie refringente, y CB la superficie contigua á la lámina de aire en que se forman los anillos. Siendo los rayos violados los mas refrangibles, se acercan mas á la perpendicular IN, y llegan, por ejemplo, en V á la segunda superficie; y por el contrario, los rayos rojos, como menos refractos, se separan menos y llegan, por ejemplo, en R. De esta disposicion resulta claramente que los rayos mas refrangibles, es decir, los violados y

azules, llegan á la lámina de aire con mayor oblicuidad que los rojos. Pero la esperiencia nos ha enseñado que los anillos formados por un solo color se dilatan y estienden mas hácia todas partes al paso que es mas oblicua la incidencia; luego en el caso presente, en que la inclinacion de los rayos violados sobre la lámina de aire ha aumentado por la refraccion, sus anillos deben dilatarse en una proporcion mayor que los rojos, que han ganado menos en inclinacion. Como esta diferencia se verifica respecto á todos los colores intermedios, debe aproximar las franjas que forman cada anillo compuesto, y concentrarlas, por decirlo asi, en un mismo anillo hasta producir el blanco, si la incidencia de los rayos es tal que los violados compensen por su esceso de oblicuidad la pequeñez primitiva de sus anillos; y en este caso no deben observarse mas que anillos blancos separados por intervalos obscuros. Mas si se continúa haciendo girar los prismas en el mismo sentido, y aumentando la incidencia de los rayos, el esceso de oblicuidad que los violados adquieren por la refraccion da á sus anillos una dilatacion mas que suficiente para igualar á los anillos rojos, y entonces deben separarse del blanco á la parte de afuera de estos anillos, sucediendo lo mismo progresivamente á los demas colores hasta el rojo, que debe quedar el último, y separado de los otros formar el contorno interior del anillo compuesto. Seria posible tambien calcular toda la sucesion de estas variaciones por las leyes con que se estienden los anillos bajo diferentes inclinaciones, combinándolas con las de la dispersion de la luz producida por el prisma; y recíprocamente se podria por medio de observaciones de este género determinar el aumento que sufre la estension de los anillos por la mayor oblicuidad. Este método parece que es uno de los empleados por Newton para calcular los últimos números de la tabla de la página 20.

Esplicando esta esperiencia hace observar Newton una circunstancia que denota cuán ingenioso y atento observador era, á saber, que para percibir claramente los anillos blancos y negros, es preciso no observarlos de cerca, sino á cierta distancia; pues mirándolos muy de cerca, no solo se confunden, sino que se ve aparecer el violado en el perímetro esterior de cada anillo, y el rojo en el interior. La razon de esto, dice, es que los rayos que llegan al ojo por diferentes puntos de la pupila tienen distintas oblicuidades respecto á los vidrios, y los mas oblicuos, si se considerasen aparte, harian aparecer los anillos mayores. Esta espansion es tanto mayor cuanto mas grande es la diferencia de oblicuidad, es decir, cuanto mas abierta es la pupila y mas próximo se halla el ojo. Ahora bien el ancho del violado debe tener la mayor estension, porque los rayos propios para escitar la sensacion de este color estan mas inclinados á la segunda superficie de la lámina de aire en que se reflejan, y tambien porque tienen una variacion mayor de oblicuidad, lo cual hace que este color salga de los bordes del blanco antes que otro ninguno, y al paso que aumenta el ancho de cada anillo, deben diminuir los intervalos obscuros hasta que los anillos inmediatos lleguen á tocarse y confundirse primero los estremos y luego los mas inmediatos al centro, de suerte que no puedan ya distinguirse separadamente, y parezca que componen un blanco uniforme.

Otra observacion igualmente digna de notarse, y que tambien se aplica perfectamente por la teoría, es que cuando se miran las láminas delgadas de aire, agua ó vidrio al traves de un prisma, se descubren en ellas muchos mas anillos que mirándolas á la simple vista; de suerte que en vez de ocho ó nueve anillos, que es todo lo mas que se consigue percibir ordinariamente, se pueden contar de este modo mas de treinta ó cuarenta muy estre-

chos é inmediatos unos á otros; y si se juzga por su proximidad y el espacio que ocupa, se puede creer que se suceden hasta centenares de veces. Para comprender bien la razon de este fenómeno volvamos de nuevo al caso mas sencillo, á saber, aquel en que los anillos estén formados por rayos de un solo y mismo color, por ejemplo, de rayos rojos. En este caso, considerándolos en una lámina cuyo grueso vaya aumentando gradualmente desde el centro á la circunferencia, como son las láminas de aire y de agua comprendidas entre dos superficies esféricas, vemos que los primeros anillos son los mas separados unos de otros, y las diferencias de sus diámetros van disminuyendo mas y mas, segun se separan de la mancha central, hasta que al fin á cierta distancia de ella estan tan inmediatos unos á otros que el ojo no puede discernir sus intervalos, y parece que forman un color continuo. Si observamos estos anillos al traves de un prisma, no sufrirán ninguna separacion notable, porque siendo igualmente refractados por el prisma los rayos que los componen, todas sus imágenes se mueven igualmente despreciando las pequeñas diferencias que provienen de la diferente incidencia de estos rayos sobre las superficies del prisma. Pero hagamos caer sobre estas mismas láminas el conjunto de rayos que componen la luz blanca; y si continuamos mirando con la simple vista, percibiremos muchos menos anillos distintos que anteriormente á causa de la sobreposicion de estos anillos y de la introduccion de unos en otros. Mas si miramos las láminas por medio de un prisma, la refraccion transportará las imágenes de todos los anillos en una misma direccion, pero no una misma cantidad, sino que trasladará mas los rayos violados, que son los mas refrangibles, y menos los rojos, que no lo son tanto. Entonces si suponemos el prisma colocado como representa la fig. 12, sucederá que en toda la parte de los anillos, colocada mas allá del centro C, los

violados, que por su naturaleza eran mas pequeños en cada órden que los rojos, se habrán acercado á estos; y si la diferencia de dispersion es bastante fuerte para compensar enteramente su inferioridad primitiva, podrá llegar á retirarse; y como lo mismo sucederá, con corta diferencia, á todos los colores intermedios comprendidos entre los anillos violados y los rojos, sucederá que todos estos anillos concentrados juntos aparecerán blancos y separados por intervalos obscuros. Entonces se estará, pues, en el mismo caso que si estuviesen formados por rayos de un solo color, y por consiguiente se podrá descubrir un número mucho mayor que antes de interponer el prisma. Pero en la posicion en que hemos supuesto este, el aumento de claridad no se verificará sino en la parte de los anillos situada mas allá de su centro con relacion al prisma, y por el contrario en las partes situadas mas acá del centro el prisma no hará mas que aumentar su confusion, porque su efecto en esta parte será acercar al centro los anillos violados, que eran los mas inmediatos á él, lo que les separará aun mas de los anillos rojos; y aumentando esta estension de las franjas de color, su sobreposicion contribuirá á mezclarlas mas, y formará antes una tinta blanca uniforme en que ningun color será bastante visible para que se pueda percibir. Segun esto, se ve que si se quisiera separar esta parte de los anillos, seria preciso colocar el prisma en sentido inverso, como representa la fig. 13. Pero entonces recíprocamente las partes situadas mas allá del centro deben mezclarse y confundirse mas, como en efecto manifiesta la observacion.

Ahora bien, puesto que de este modo se llegan á percibir anillos en la parte de la lámina de aire en que no se percibian á la simple vista, se sigue que una lámina semejante puede aparecer de un blanco continuo y uniforme, aunque en realidad la luz forme en ella anillos que separados por el pris-

ma lleguen á ser sensibles. Esto se puede observar no solo en las láminas de aire comprendidas entre dos prismas, sino tambien en las bolas de agua de jabon; porque antes que hayan llegado al grado de sutileza necesario para reflejar colores sensibles, el prisma hace descubrir ya en ellas anillos concéntricos. Del mismo modo las láminas delgadas de mica, de agua ó de vidrio, aunque no sean bastante sutiles para presentar anillos de color á la vista desnuda, presentan vistas por el prisma una infinidad de anillos irregulares que ondulan de mil modos sobre su superficie, siguiendo las desigualdades insensibles de su grueso. Se comprenderá fácilmente, dice Newton, la razon de estos fenómenos si se considera que todos estos anillos, en número infinito, existen ya en las láminas cuando se miran á la simple vista, aunque á causa de lo ancho de sus circunferencias, y de lo elevado del órden á que corresponden, se hallan tan mezclados y confundidos, que parece que compongan un blanco uniforme, confusion que el prisma hace desaparecer separándolos. Para hacer bien esta esperiencia deben colocarse las laminitas sobre un cuerpo negro, y mirarlas por el prisma en la disposicion que presenta la fig. 14.

En fin, todos los fenómenos descritos en la teoría de Newton sobre los anillos de color confirman las consecuencias que habiamos sacado anteriormente sobre la naturaleza de los rayos de luz, á saber, que las propiedades coloríficas de estos rayos no dependen de ninguna alteracion ni modificacion que produzcan en ellos los medios por donde atraviesan, sino que les son inherentes, y las poseen ya al emanar de los cuerpos luminosos, y las llevan consigo á todas las distancias, sin límite ninguno, conservándolas sin alteracion en todos los medios que atraviesan.

Accesos de fácil transmision y de fácil reflexion.

Habiendo establecido por medio de la esperiencia las leyes fundamentales de la distribucion y sucesion de los anillos de colores formados por las láminas delgadas, Newton dedujo de este conjunto una nueva propiedad física de las moléculas de luz; propiedad que no solo reproduce todos los pormeres observados por Newton, sino que esplica otros muchos hechos de una naturaleza diferente en la apariencia, y que le eran enteramente desconocidos. Para que se conozca bien que esta propiedad resulta necesariamente de los fenómenos, sin mezcla alguna de hipótesis, presentaremos sucesivamente las proposiciones de Newton, añadiendo solamente á ellas las esplicaciones necesarias para comprenderlas perfectamente, y en seguida haremos ver en cada una de ellas como es una espresion fiel de tal ó tal fenómeno que se observa en los anillos.

Recordemos ante todo que la transmision de la luz es progresiva. Este es un hecho que hicieron conocer los eclipses de los satélites de Júpiter, y que ha confirmado despues la aberracion de las estrellas fijas. De estos dos fenómenos se deduce igualmente que las moléculas luminosas emplean 8′ 13″ de tiempo para recorrer la distancia media del sol á la tierra; su movimiento es uniforme en todo este intervalo, y aun en toda la estension del órden de Júpiter. No se hallan diferencias sensibles de velocidad entre las moléculas de refrangibilidad distinta, pues si existiesen, cuando un satélite entra en la sombra ó sale de ella, deberia aparecer sucesivamente teñido con los colores del prisma, lo cual no se verifica. La velocidad comun, determinada de este modo, es la que la luz tiene en el vacío, porque los espacios celestes pueden considerarse como vacíos de toda materia ponderable y refringente cuando las moléculas de luz atraviesan medios cuyas

partes obran sobre ellas por atracciones á pequeña distancia, su velocidad en ellos es á su velocidad en el vacío, como el seno de incidencia en este, es al seno de refraccion en el medio material; de donde resulta que la velocidad de la luz en los cuerpos es siempre mayor que en el vacío, y crece con su poder refringente.

He aqui, las nuevas propiedades de la luz que Newton establece como consecuencias de sus observaciones sobre las láminas delgadas.

Primera proposicion. Toda molécula luminosa, que ha atravesado una superficie refringente cualquiera ha adquirido en el mismo acto cierta disposicion transitoria que se reproduce periódicamente y con iguales intervalos durante toda la marcha de la molécula por el mismo medio; de donde resulta que cada vez que se renueva esta disposicion la molécula de luz se transmite *fácilmente* al traves de una segunda superficie refringente si entonces se presenta; y por el contrario, en las intermisiones de este estado se refleja *fácilmente, aunque no necesariamente* en una superficie semejante. A estas sucesiones de estado ó á estas disposiciones diversas ha llamado Newton *acceso de fácil transmision* y *acceso de fácil reflexion*, y á la distancia corrida por la molécula entre uno y otro acceso, la llama *intervalo de los accesos*; de suerte que la *longitud de cada acceso* es la mitad de estos intérvalos. Espresando analíticamente estas definiciones se puede determinar la especie y fase del acceso en que se hallará una molécula de luz, en un instante cualquiera en un medio dado, conociendo estos elementos en el instante de su entrada ó de su salida, y sabiendo cuál es la longitud de los accesos respecto á esta molécula.

Esto no es mas que una manera general de enunciar el hecho, y la ley de las transmisiones y de las reflexiones alternativas que se verifican en diferentes gruesos bajo cada incidencia conocida; solo

que Newton presenta estas alternativas como indefinidas, y las atribuye á una propiedad fisica de las partículas de luz que las hace susceptibles de ser modificadas por las superficies refringentes de los cuerpos; dos puntos que conviene que examinemos.

Cuando hemos observado á la simple vista los anillos compuestos no hemos podido descubrir en ellos mas que siete ú ocho sucesiones ó alternativas bien marcadas; y puedo decir de antemano que nunca se perciben mas en cualquiera otra serie de fenómenos que siga leyes semejantes. Pero la analisis, y por decirlo asi, la direccion que hemos hecho del fenómeno nos ha hecho ver que esta limitacion proviene únicamente de la sobreposicion de los anillos de todos colores formados por los diferentes rayos simples de que se compone la luz blanca. Asi es que hemos descubierto un número mucho mayor de anillos cuando los hemos formado de un hacecillo de luz simple; y al mismo resultado hemos llegado tambien de un modo mas sencillo, separando los anillos compuestos por medio del prisma, en virtud de su distinta refrangibilidad. Estas observaciones nos han probado que las alternativas de reflexion y transmision se estienden á gruesos mucho mayores de los que habiamos creido al principio; y por el modo con que se reunen los anillos, á medida que aumenta el grueso, debemos juzgar que se producen tambien en gruesos mucho mayores que aquellos en que podemos distinguirlos aun con el auxilio del prisma. En efecto, otras esperiencias de Newton manifiestan que estas alternativas existen aun en el vidrio en gruesos que llegan hasta un cuarto de pulgada; y el mismo método pudiera hacer reconocer su existencia aun mucho mas allá. Ahora bien, como estos gruesos son millares de veces mayores que la distancia á que puede ser sensible la variacion de las fuerzas atractivas ó repulsivas de los medios, es necesario in-

ferir que continuando hasta allí las alternativas de reflexion y transmision deben continuar indefinidamente.

De aqui resulta que estas alternativas dependen de alguna modificacion física producida en las moléculas de luz á su paso por la primera superficie refringente, la cual llevan despues consigo en toda la estension del medio que se les hace correr. De otro modo, cuando las moléculas luminosas llegasen á la segunda superficie de este medio, su reflexion ó transmision no dependerian ya de su distancia á la primera superficie, sobre todo en gruesos en que se sabe que es imposible que puedan sentir su accion inmediatamente. Asi pues, la dependencia de esta primera superficie en que se encuentran entonces las moléculas bajo el aspecto de reflexion ó de transmision, sin sentir una influencia actual, prueba necesariamente la existencia de una modificacion durable que han recibido de ella segun la proposicion de Newton.

Es muy importante observar que estas modificaciones no dan á las partículas de luz una necesidad *absoluta* de reflejarse ó transmitirse, sino solo una disposicion ó *facilidad* mayor para una ú otra cosa. Porque las láminas muy delgadas de vidrio ó de mica que en el aire presentan por reflexion colores muy vivos, mojadas por su segunda superficie presentan los mismos colores, pero mucho mas débiles; de suerte, que cierto número de moléculas de luz que al principio se reflejaban en esta segunda superficie se transmiten cuando su fuerza repulsiva se halla debilitada ó combatida por la presencia del medio esterior. Este fenómeno no se produce solo en la segunda superficie de los cuerpos delgados, sino tambien en la de los cuerpos gruesos, puesto que la intensidad de la reflexion se debilita en ellos cuando se ponen en contacto con un medio cuyo poder refringente mayor ó menor se diferencia menos del suyo que el del aire ó el

vacío. En este caso, como en el anterior, la reflexion cualquiera que sea su intensidad se verifica siempre con el mismo sistema de colores mas ó menos compuestos que el cuerpo puede reflejar en su segunda superficie, segun es mas delgado ó mas grueso. Del mismo modo, cuando un rayo de luz blanca, despues de haber atravesado cierto espacio de aire, encuentra la superficie de otro medio, tal como el agua, una parte de las moléculas luminosas que componen este rayo, se halla dispuesta á reflejarse en la superficie comun del agua y el aire; y si el grueso de este ha sido bastante grande con relacion á los que producen anillos de colores, hay, como probaremos mas adelante, igual cantidad de moléculas, poco mas ó menos, en cada una de estas dos disposiciones. Entonces la reflexion se verifica abundantemente si la segunda superficie del aire está limitada por una lámina de agua gruesa; pero es muy débil y casi insensible si la lámina es tan delgada que su grueso no escede de una millonésima de pulgada inglesa, porque segun lo que hemos observado en las bolas de agua, una lámina semejante no refleja ninguna luz en su segunda superficie, y casi ninguna en la primera. Asi, en este caso, la disposicion á reflejarse que pueden tener las moléculas incidentes al llegar á esta primera superficie queda sin efecto, y por consiguiente solo lleva consigo la facilidad pero no la necesidad de la reflexion. Para que esta se verifique, no es suficiente que la molécula luminosa se halle favorablemente dispuesta, sino que es necesario que la fuerza reflejante tenga una energía tal, que pueda en este estado favorable de las partículas destruir completamente su velocidad y hacerla caminar en sentido contrario. Del mismo modo la tendencia á la transmision deja de ser eficaz cuando la fuerza reflejante es bastante enérgica para rechazar aun á las partículas dotadas de aquella disposicion, como sucede en la reflexion muy oblicua sobre los cuerpos muy pulimentados,

y particularmente sobre los metales, puesto que entonces reflejan mas de la mitad de la luz incidente como probaremos mas adelante. Se ve, pues, por estos ejemplos, que Newton ha seguido fidelísimamente los fenómenos, dando á los accesos unas denominaciones que indicasen no una necesidad *absoluta* de reflexion ó transmision, sino una disposicion condicional como la que indican las palabras acceso de *fácil reflexion* y de *fácil transmision.*

Ademas, cuando un rayo de luz simple emanado de un cuerpo luminoso cae directamente ó por refraccion sobre un medio refringente en el cual penetra, las moléculas luminosas transmitidas que al atravesar la superficie refringente se hallan todas en el estado de fácil transmision, no poseen todas este estado de un modo igualmente completo. En efecto, si esta igualdad se verificase, como despues los accesos de todas las partículas son iguales en longitud, y sus velocidades son tambien iguales, puesto que se supone el rayo homogéneo, es claro, que á cualquiera distancia deberian hallarse todas modificadas exactamente del mismo modo; y por lo mismo, cuando llegasen á la segunda superficie del cuerpo en que se mueven deberian reflejarse ó transmitirse todas á un tiempo. Mas esto no sucede asi, porque aun eligiendo la luz mas homogénea no se refleja nunca sino una porcion de ella, que depende de la naturaleza del cuerpo refringente y de la del medio que le rodea (1). Y puesto que aplicando sucesivamente á la segunda superficie de un mismo cuerpo dos medios de distinta fuerza refringente, producen la reflexion mas ó menos abundante de un mismo rayo homogéneo, es necesario que haya alguna causa que pro-

(1) Esta division no se verifica solo en los cuerpos gruesos sino tambien en las láminas delgadas; porque observando los anillos de colores que se forman por reflexion en su segunda superficie, hemos observado que la reflexion está muy lejos de ser total aun en el medio de cada anillo simple.

duzca la eleccion de las moléculas que desde luego ceden á la mas débil de estas dos reflexiones; y como esta eleccion se verifica aun entre moléculas perfectamente homogéneas es indispensable que provengan de alguna diferencia en las disposiciones físicas que tienen las partículas para reflejarse ó transmitirse en una misma superficie. Luego teniendo estas partículas iguales velocidades y accesos de igual longitud, es absolutamente necesario que su desigualdad llegue hasta la primera superficie del cuerpo, y hasta su primera emision de los cuerpos luminosos.

Pará descubrir en qué consiste esta desigualdad es preciso considerar que cuando las moléculas luminosas pasan de un acceso de fácil transmision á un acceso de fácil reflexion, cualquiera que sea la naturaleza de estos accesos, es muy verosimil que no lo hagan de una manera áspera y repentina, sino gradual y sucesiva, perdiendo poco á poco su disposicion á transmitirse hasta desaparecer enteramente, y adquiriendo despues una disposicion contraria, es decir, una tendencia á reflejarse, la cual, muy débil al principio vaya aumentando poco á poco hasta cierto máximum, y despues empiece otra vez á debilitarse por los mismos grados. Supongamos, pues, que una infinidad de moléculas luminosas, homogéneas emanadas simultáneamente ó casi simultáneamente de un cuerpo luminoso, se hallen, al salir de su superficie en todos los diferentes periódos de ambas especies de accesos, ya en virtud del acto mismo de la emision, ya como que parten de los diferentes puntos de la capa incidente infinitamente delgada, á traves de la cual puede verificarse siempre la emision, esto bastará para producir en toda la marcha de estas moléculas las variaciones de disposicion que nos ha hecho conocer la esperiencia. En efecto, cuando lleguen juntas á la primera superficie de un cuerpo reflejante, que haya de reflejar una parte de ellas y refractar el

resto, se verificará con preferencia la reflexion de aquellas partículas que se hallen mas dispuestas á sufrirla. De suerte que con una fuerza reflejante infinitamente enérgica se reflejarian todas las moléculas, cualquiera que fuese la disposicion en que se hallasen; con una fuerza menor, las moléculas que se hallen en un acceso de fácil transmision en el momento de su incidencia, serán las primeras que se transmitan; y se puede concebir un grado de energía tal, que se transmitiesen todas ellas, mientras se reflejarian las moléculas que se hallasen en un acceso de fácil reflexion, ya estuviesen en el principio, en el medio ó al fin de este acceso. En fin, con una fuerza reflejante, mas débil todavia, se transmitirán las partículas que se hallen hácia el principio ó fin de un acceso de fácil reflexion, y solo se reflejarán las que se encuentren en la parte mas enérgica de este mismo acceso, el número de estas irá disminuyendo, al paso que la fuerza reflejante hasta llegar á los últimos grados de esta en que solo se reflejarán las partículas que se hallen exactamente en el medio, y por consiguiente en lo mas fuerte del acceso, las cuales serán poquísimas. En cualquier caso, desde el momento en que se haya transmitido cierto número de moléculas al traves de la primera superficie refringente de un cuerpo, se hallarán conducidas todas por este mismo hecho al estado de fácil transmision; pero adquirirán este estado de un modo mas ó menos completo, segun las disposiciones mas ó menos fovorables en que se hallaban en el momento de su incidencia; y continuando esta desigualdad primitiva por toda la estension del cuerpo refringente que atraviesan hasta la segunda superficie determinará la eleccion de las partículas que se reflejarán con preferencia en ella, en virtud de una fuerza repulsiva determinada.

Para demostrar esto de un modo evidente, representemos por AB, fig. 15, la longitud de los ac-

cesos de cierta especie de moléculas luminosas en un medio dado, y designemos la energia variable de cada acceso en sus diferentes periódos, por las ordenadas de una curva ABD, cuya naturaleza dejaremos que sea cualquiera. Siempre será necesario que esta curva pase por los puntos A y B, estremos del acceso, que sus ordenadas sean nulas en ellos, y vayan creciendo desde alli continuamente y de una manera uniforme hasta el medio O del acceso en que llegarán á su maximum OM. Si queremos estender esta construccion á todos los accesos alternativos que sufre la molécula mientras atraviesa el medio dado no hay mas que tomar sobre su direccion desde el punto B, una serie de partes BC, CD &c. iguales entre sí y á la longitud del primer acceso AB; y construyendo despues sobre cada una de ellas la curva de intensidad AMB alternativamente á uno y otro lado del eje ABCD, la curva total AMBM′C... que resulte, dará la especie é intensidad del acceso que animará á la molécula en un punto cualquiera de su camino. Ahora bien, supongamos que un rayo enteramente formado de moléculas luminosas semejantes á esta, cae sobre la primera superficie del medio, y se introduce en él en parte, todas las moléculas introducidas se pondrán en un estado de fácil transmision, pero segun lo que hemos visto acerca de sus diferencias primitivas, no tomarán todas de un mismo modo este estado; y en su número infinito podrán presentar todos los periódos imaginables de él, desde el principio hasta el fin. Construyamos, pues, respecto á cada una de ellas, la serie de los accesos siguientes, desde la superficie refringente SS, fig. 16, y examinemos lo que deberá suceder cuando se presente sucesivamente una segunda superficie á diferentes distancias de la primera.

Para empezar por un caso estremo, supondremos primeramente que el medio contiguo á esta segunda superficie sea tal, que la reflexion se verifi-

que en *todas* las partículas luminosas que se presenten á ella en cualquiera punto de un acceso de fácil reflexion. Esta posibilidad no depende, como hemos visto antes, sino de la relacion que hay entre las fuerzas refringentes del cuerpo y del medio contiguo. En tal caso, si en nuestra construccion hacemos mover una línea S′S′ paralelamente á SS para representar el límite de la segunda superficie, es claro que la reflexion no será nunca totalmente nula, por pequeño que sea el grueso que se dé al cuerpo refringente, á menos que no sea enteramente nulo el mismo grueso; porque desde el momento en que la línea S′S′ se separe de SS, habrá cierto número de partículas luminosas que se hallarán en el estado de reflejarse. Este número, muy pequeño al principio, aumentará progresivamente al paso que S′S′ se separe de SS hasta que al fin llegando esta línea á I_1 á una distancia de la superficie igual á la longitud *i* del acceso, toda la luz transmitida se hallará en el estado de fácil reflexion, y por consiguiente esta será total. Pero esto no se verificará sino á esta distancia exacta, porque en el momento en que S′S′ se separe mas de SS, habrá cierto número de partículas que pasarán al estado de fácil transmision, y que se sustraerán á la accion de las fuerzas reflejantes, puesto que hemos limitado la posibilidad de la reflexion á las que se hallen en una fase cualquiera del estado contrario. Asi, la proporcion de luz refleja disminuirá gradualmente al paso que S′S′ se separe de I_1 y al fin llegará á ser nula en I_2 á una distancia $2i$ de la primera superficie. Desde este término, la reflexion empezará á aumentar de nuevo siguiendo los mismos periódos; será total en I_3, nula en I_4 y asi sucesivamente en toda la estension del cuerpo; de suerte que todos los fenómenos, tanto de transmision como de reflexion, se hallarán limitados por los términos sucesivos de las dos series siguientes:

Transmision total o $2i$ $4i$ $6i$.....
Reflexion total i $3i$ $5i$ $7i$.....

La primera indica los gruesos exactos en que la reflexion es enteramente nula, y la segunda aquellos en que es total.

Si en lugar de suponer las dos superficies de entrada y de salida exactamente paralelas, se suponen inclinadas una á otra con un ángulo tan pequeño que la intensidad de las fuerzas reflejantes no se altere de un modo sensible, la sola variabilidad de grueso que resulte de esta inclinacion producirá entre la primera y la segunda superficie, todas las variedades de distancia que acabamos de suponer, y todas las alternativas de reflexion y de transmision que resultan de ellas; es decir, que la luz transmitida perpendicularmente al través de la primera superficie se reflejará ó transmitirá en la segunda, segun el grueso ó profundidad á que la halle. Asi esta segunda superficie vista por reflexion ó por transmision presentará en sus diferentes puntos alternativas luminosas exactamente análogas á los diferentes órdenes de anillos formados por una luz homogénea en láminas de agua ó de aire comprendidas entre dos objetivos. Solo sí, en razon de la energía que hemos supuesto aqui á las fuerzas reflejantes, se hallará que las zonas luminosas transmitidas y reflejas tendrán iguales anchos y estarán separadas en cada serie por líneas negras infinitamente delgadas; circunstancias que no se verifican en los anillos de colores que podemos producir en los cuerpos refringentes que nos ofrece la naturaleza.

Esto consiste en que estos cuerpos, contando con los cuerpos que los rodean, no tienen una fuerza repulsiva tan enérgica como la que acabamos de suponer; porque cualquiera proporcion que se dé á su grueso, la reflexion en su segunda superficie nunca es total, á lo menos baja la incidencia perpendicular que es la única que aqui consideramos. Por consiguiente, cuando esta segun-

da superficie se halla á una distancia conveniente para producir la reflexion mas abundante; como en I_1 I_3 I_5.... en cuyo caso toda la luz incidente se halla en un periódo de fácil reflexion, hay aun cierto número de moléculas luminosas que se sustraen á las fuerzas reflejantes, á pesar de la buena disposicion en que se encuentran; donde se ve que esta disposicion no es eficaz sino mas allá de cierto grado de energía. Por ejemplo, suponiendo la totalidad de la luz uniformemente repartida entre todas las fases del acceso, si la mitad de la luz se sustrae á la reflexion, será una prueba de que esta solo se verifica en las partículas que han sufrido mas del cuarto y menos de los tres cuartos del acceso; si se sustrae la cuarta parte, los límites de la reflexion serán $\frac{i}{8}$ y $\frac{7i}{8}$; y asi sucesivamente. En general, si se designa el primero de estos límites por e, el segundo será $i-e$ puesto que deben hallarse á igual distancia del medio del acceso. Esto supuesto, y aplicando á las nuevas condiciones la construccion geométrica de que acabamos de usar, es evidente, que la intensidad de la reflexion no será ya nula solamente cuando la segunda superficie S′S′ coincida con la primera SS, sino tambien en cualquiera intervalo de grueso, en que su distancia á la primera sea menor que e. En este grueso exacto empezará á poderse reflejar una sola molécula, que será aquella que al entrar terminaba un acceso de fácil transmision; porque habiendo empezado desde entonces un acceso de fácil reflexion, cuando llega al grueso e ha adelantado esta misma cantidad e en el periodo del acceso, lo cual la hace susceptible de poderse reflejar, y desde este punto continuará siéndolo hasta el grueso $i-e$ en que se halla á igual distancia del fin del acceso. Las demas moléculas que se hallaban primitivamente menos adelantadas en su acceso de transmision inicial; deberán llegar sucesi-

vamente á gruesos mayores que e para poder reflejarse, de suerte que desde e la intensidad de la reflexion irá aumentando hasta el grueso $i—e$, en que la primera molécula empieza á pasar mas allá de la parte eficaz de su acceso. Pasado el grueso $i—e$, esta molécula se transmitirá; pero como suponemos todas las moléculas uniformemente repartidas al tiempo de entrar en los diversos periodos de la transmision, habrá en aquel mismo instante otra molécula que hallándose menos adelantada en su estado de transmision inicial, empezará á llegar al punto conveniente, y se reflejará en vez de la primera. La intensidad de la luz refleja será, pues, constante en este grueso, y permanecerá la mismo hasta el grueso $i+e$, en que la reflexion empieza aun respecto á la molécula luminosa que al entrar en el cuerpo empezaba un acceso de fácil transmision. Pero mas allá de este límite, no se presentarán ya nuevas moléculas para reemplazar á las que se sustraigan sucesivamente á la reflexion; de suerte que la intensidad de la luz refleja empezará á decrecer y decrecerá hasta llegar al grueso $2i—e$, en que será absolutamente nula, no hallándose entonces ninguna de las moléculas refractas en un estado de fácil reflexion. Entonces, pues, la transmision será total, y asi permanecerá hasta el grueso $2i+e$, en que volverá á empezar un nuevo periodo de reflexiones, y asi sucesivamente en toda la estension del medio.

Si se quieren realizar estas alternativas en una sola y misma lámina refringente, bastará dar á sus dos superficies una inclinacion muy pequeña entre sí; y haciendo caer perpendicularmente sobre la primera un hacecillo de luz simple, se observará por reflexion en la segunda una sucesion alternativa de bandas luminosas y de bandas negras, limitadas por los diversos gruesos que señalan nuestros cálculos. Este es exactamente el fenómeno de los anillos reflejos formados por una luz homogénea.

Tambien se observarán por transmision, alternativas luminosas y obscuras análogas á los anillos transmitidos; pero las zonas obscuras no serán en ningun punto enteramente negras, porque siempre habrá una parte de luz transmitida aun en lo gruesos medios i, $3i$, $5i$.... en que es mas abundante la reflexion.

Se puede calcular la proporcion de la luz que se transmite en estos mismos parages, cuando se conoce el estado inicial de cada molécula refracta, y la distancia á que empieza ó acaba la reflexion hácia los estremos de cada acceso. Asi se halla que á medida que se debilitan las fuerzas reflejantes, disminuyen los intervalos de grueso ocupados por los anillos lucidos, y se diferencian menos de los intervalos de transmision á los que igualan del todo, cuando las fuerzas reflejantes son infinitamente débiles. Este caso es el límite de los que pueden presentar las esperiencias; pero la debilidad del poder reflejante de la mayor parte de los cuerpos diáfanos, bajo la incidencia perpendicular, le realiza casi exactamente. Esta es la causa de la igualdad observada por Newton, y que le ha parecido bastante aproximada para detenerse en ella.

En toda la discusion anterior hemos considerado la luz refracta como repartida uniformemente al entrar en el cuerpo entre todos los grados posibles de un acceso de fácil transmision. Es posible que esta uniformidad no se verifique rigorosamente, y aun es muy verosimil que sea así, porque la refraccion no se verifica nunca sino á consecuencia de una reflexion exterior que debe rechazar especialmente las moléculas incidentes que se hallan entonces en las fases mas enérgicas de un acceso de fácil reflexion, y que por lo mismo si hubiesen sido refractadas, serian las menos dispuestas á tomar el estado contrario; por lo cual es de presumir que la luz transmitida, en el instante que entra en el cuerpo que la refracta, contenga una propor-

cion dominante de moléculas en los periódos mas enérgicos de un acceso de transmision, y acaso muy pocas ó ninguna que se hallen solamente en las fases mas débiles del principio y fin de un acceso semejante. Esta circunstancia contribuiria tambien á igualar los intervalos de grueso e, $2i-e$, en que se verifica la transmision y la reflexion. Por lo demas no produce en las demas consecuencias que hemos establecido otra modificacion que la que resulta de otra ley de intensidad en las proporciones de la reflexion en los diferentes periódos de cada anillo lucido.

Hasta aqui hemos supuesto que la luz, ya refleja, ya refracta, estaba compuesta de una sola especie de moléculas luminosas; si suponemos ahora que las contiene de diversas naturalezas, cada especie de moléculas obrará conforme á leyes exactamente semejantes, solo que los accesos no serán en todas de una misma longitud. No nos falta, pues, mas que fijar esto; y tal es el objeto de las proposiciones siguientes establecidas por Newton.

Cuando las moléculas luminosas que forman los ocho límites de los colores del espectro, despues de haber atravesado una misma superficie refringente, entran en un mismo medio bajo la incidencia perpendicular, ó en general, bajo una incidencia comun, los intervalos de los accesos siguientes de fácil reflexion y de fácil transmision, son entre sí exactamente, ó con muy poca diferencia, como las raices cúbicas de los cuadrados de los números 1, $\frac{8}{9}$, $\frac{5}{6}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{5}$, $\frac{9}{16}$, $\frac{1}{2}$; y las moléculas luminosas cuya naturaleza está comprendida entre estos límites, tienen los intervalos de sus accesos comprendidos entre dichos números. Esta es una consecuencia matemática de las relaciones halladas antes, por medio de la esperiencia, entre los gruesos de las láminas que reflejan ó transmiten los diversos colores de un mismo anillo, con una oblicuidad comun.

Pero aun no hemos considerado sino un solo y mismo medio; para estender las determinaciones de los accesos de un medio á otro, Newton establece la proposicion siguiente.

Cuando las moléculas luminosas de cualquiera naturaleza que sean, pasan *perpendicularmente* por diferentes medios, los intervalos de los accesos de fácil transmision y de fácil reflexion en dos de estos medios, son entre sí, como el seno de incidencia es al seno de refraccion, cuando las moléculas que se consideran pasan de uno á otro. Esta es la generalizacion matemática de las relaciones observadas anteriormente entre los gruesos de agua ó de aire que reflejan ó transmiten una misma tinta, bajo la incidencia perpendicular. Resulta de aqui, que en cada especie de moléculas luminosas, la longitud de los accesos *bajo la incidencia perpendicular*, es siempre la misma en el mismo medio, cualesquiera que sean los cuerpos que la luz haya atravesado antes de llegar á él.

Segun esta regla, si se toma por unidad el grueso de aire, que visto perpendicularmente refleja cierta tinta, el grueso de vacío que reflejase esta misma tinta seria mayor que 1 en la proporcion de la relacion de refraccion, es decir, como 3388 á 3389; de suerte que seria necesario tener métodos de una exactitud inconcebible para poder notàr alguna diferencia; asi cuando se forman anillos de colores comprimiendo una lámina de aire entre dos objetivos, el tamaño y color de estos anillos, no parece que sufren ninguna alteracion, aunque se introduzcan los objetivos en el vacío, ó aunque se calienten fuertemente para arrojar el aire intermedio. Maceas, que fue el primero que hizo estas pruebas, se admiró mucho de hallarlas infructuosas, y no se dejaron de presentar como una grande objecion contra la teoría de Newton, de la cual son, segun se ve, una consecuencia.

Por medio de las dos últimas proposiciones, po-

drá fijarse generalmente la longitud de los accesos bajo la incidencia perpendicular en cualquiera especie de medio refringente y de moléculas luminosas, dado el valor de un solo caso conocido. Esto se puede hacer fácilmente por las observaciones de Newton sobre los gruesos de aire que reflejan ó transmiten un color cualquiera bajo la incidencia perpendicular. Elijamos, por ejemplo, las moléculas luminosas que forman en el espectro el límite del amarillo y el naranjado; hemos hallado que las alternativas de su transmision y de su reflexion espresadas en millonésimas de pulgada inglesa, se suceden en los gruesos siguientes:

Transmision.... 0 $\frac{2}{178000}$ $\frac{4}{178000}$

Reflexion.... $\frac{1}{178000}$ $\frac{3}{178000}$ $\frac{5}{178000}$

y segun esto *la longitud de un acceso* respecto á esta especie de luz, será $\frac{1}{178000}$ de pulgada inglesa; y su doble ó $\frac{2}{173000}$ ó $\frac{1}{178000}$ será el *intervalo* de dos accesos de la misma naturaleza, ya de transmision, ya de reflexion. Combinando este resultado con una de las proposiciones anteriores, se deducen los intervalos de los accesos respecto á las diferentes especies de moléculas que forman los ocho límites de los colores del espectro. He aqui sus valores en millonésimas de pulgada inglesa.

Longitudes de los accesos de las diferentes moléculas de luz.				
	en el vacío.	en el aire.	en el agua.	en el vidrio.
Violado estremo	3,99816	3,99698	2,99773	2,57870
Límite del violado y el azul obscuro. . . .	4,32436	4,32308	3,24231	2,78908
— del azul obscuro y el claro	4,51475	4,51342	3,38507	2,91188
— del azul claro y el verde.	4,84284	4,84142	3,63107	3,12350
— del verde y el amarillo.	5,23886	5,23732	3,92799	3,37891
— del amarillo y el naranjado	5,61963	5,61798	4,21349	3,62450
— del naranjado y el rojo	5,86586	5,86414	4,39811	3,78331
Rojo estremo.	6,34628	6,34441	4,75831	4,09317

Los números que espresan los accesos en el aire se reducen de la tabla de la página 20, doblando todos los valores de *e* relativos á los límites de los diversos colores. Los números de las otras columnas se han obtenido multiplicando estos primeros resultados por $\frac{3339}{3338}$ para el vacío, $\frac{3}{4}$ para el agua, y $\frac{20}{31}$ para el vidrio que usaba Newton.

Ahora nos es preciso unir entre sí las reflexiones y transmisiones producidas por un mismo anillo con diferentes oblicuidades. Para esto Newton modifica los intervalos de los accesos conforme á la misma tabla citada, y á la ley general deducida de ella.

Aunque estas relaciones se han establecido por observaciones hechas sobre láminas curvas, no por eso deja de ser legítima la aplicacion que Newton hace aqui de ellas á las láminas paralelas, porque los gruesos comparados estaban todos deducidos de las medidas tomada sobre el diámetro transversal de los anillos, de suerte que los rayos luminosos que limitaban cada diámetro, atravesaban la lámi-

na delgada en puntos en que las tangentes á sus dos superficies eran sensiblemente paralelas, lo cual hacia constante el grueso que los separaba.

Pero los valores de los accesos oblicuos sacados de estas observaciones no podrian emplearse si las dos superficies que atraviesa el rayo estuviesen suficientemente inclinadas una á otra para que fuesen sensiblemente distintas las longitudes de los accesos á la entrada y á la salida. Las esperiencias de Newton no deciden cómo variarian entonces los accesos cerca de la segunda superficie, y este es por consiguiente un punto que falta estudiar.

Las determinaciones anteriores, sacadas de la esperiencia, caracterizan todas las modificaciones que sufren los accesos en el acto de la refraccion. Ahora es necesario determinar las que esperimentan de parte de la reflexion; mas las observaciones que hemos presentado hasta aqui no pueden servir para resolver este problema, porque la sutileza de las láminas empleadas de modo que se puedan observar separadamente las influencias que sufren los rayos antes y despues de reflejarse en su segunda superficie, ó á lo menos los indicios que pueden sacarse de tales esperiencias no pueden percibirse sino despues de haber separado por algun otro método las diferentes acciones que se producen. Asi lo ha hecho Newton por medio de una nueva serie de observaciones, en las cuales ha hecho sensibles los anillos en láminas gruesas, en que podian distinguirse los dos caminos de los rayos antes y despues de la reflexion. El conjunto de estos nuevos fenómenos le ha conducido á la proposicion siguiente.

Cuando las moléculas luminosas, de cualquiera especie que sean, al llegar á la segunda superficie del cuerpo en que se mueven se reflejan en ella de un modo regular ó irregularmente diseminadas, vuelven á adquirir despues de la reflexion nuevos accesos contados desde la superficie reflejante; y la longitud de estos accesos es la misma que hubiera

sido si las moléculas, al venir del medio esterior al cuerpo en que se hallan, hubiesen entrado en este con la oblicuidad que les da la reflexion. Esta última proposicion completa los caractéres de los accesos.

CAPITULO VI.

Aplicacion de la teoría anterior á la reflexion de los rayos de luz que han atravesado cuerpos gruesos.

Determinados completamente, por lo que precede, los accesos de las moléculas luminosas, vamos á deducir por medio del raciocinio las consecuencias que resultan de ellos respecto á la refraccion y y á la reflexion de la luz en la segunda superficie de los cuerpos gruesos, á fin de ver si estas consecuencias se hallan conformes con las observaciones.

Para tomar estos fenómenos desde su orígen consideremos primero un cuerpo luminoso colocado en un medio indefinido, tal como el aire; y siguiendo con el pensamiento las diferentes moléculas luminosas que emanan de él, veamos cuál debe ser á cualquiera distancia su tendencia á la reflexion ó á la refraccion. Para resolver este problema es necesario que se conozca la naturaleza del medio, la de las partículas luminosas emitidas, el sentido de su introduccion, y el estado inicial de cada una de ellas en el momento en que se sustrae á la accion del cuerpo radiante. Con los dos primeros datos se calculará la longitud de los accesos de cada partícula; y añadiendo esta longitud á sí misma, empezando desde la posicion y estado primitivo, se conocerán todas las alternativas de aquel estado y del opuesto. Entonces, si se coloca en cualquier punto una superficie cuya fuerza reflejante sea conocida, no perdiendo de vista sus relaciones con el medio que la rodea, se podrá decidir por el estado en que se halle cada partícula luminosa, si cederá

ó no á la reflexion. Estas serán las modificaciones propias de cada partícula. Si despues se quieren calcular los fenómenos de coloracion que resultarán de su mezcla, se conseguirá componiendo sus facultades coloríficas por el método de Newton, que hemos empleado ya para un uso semejante.

Pero esta composicion solo será necesaria en el caso de que el medio atravesado por la luz sea estremamente delgado; porque si ofrece bastante estension para que las moléculas luminosas menos refrangibles sufran en él solo doce ó quince accesos, el efecto de la reflexion se hará sensiblemente constante, á lo menos respecto á nuestros sentidos, y el rayo reflejo aparecerá siempre del mismo color que la luz incidente. Este es el caso de la reflexion en la segunda superficie de los cuerpos gruesos.

Para concebir la causa de esto es necesario recordar que en la division general del espectro hay una cierta estension ocupada por el violado, otra por el azul obscuro, otra por el claro, y asi en los demas colores principales, es decir, que la sensacion de cada uno de estos colores no va rigorosamente unida á una sola especie de rayos fija de un modo matemático, sino que puede escitarse por rayos de una refrangibilidad tan poco diferente, que tengan entre sí bastante semejanza para que los confundamos. Segun esto, podemos considerar en masa los efectos de estos diferentes grupos en los fenómenos de coloracion. Empecemos eligiendo uno de ellos, por ejemplo, el violado, y supongamos que la luz emitida contenga únicamente las variedades de partículas que pueden producir la sensacion de este color; y últimamente, concibamos que todas estas partículas se sustraen simultáneamente á la accion del cuerpo luminoso, y en el mismo periodo de un acceso de igual naturaleza en todas. En este caso su diferente refrangibilidad dará á sus accesos diferentes longitudes; y segun la tabla última que hemos puesto, si la de los mas re-

frangibles es 3,99698, la de los menos refrangibles será 4,32308; lo cual da en cada acceso una diferencia de 0,3261. Por consiguiente, á una misma distancia del cuerpo luminoso, las moléculas violadas mas refrangibles habrán sufrido un número de alternativas mayor que las otras, y es fácil concluir que despues de 13¼ accesos, poco mas ó menos, la diferencia 0,3261, repetida continuamente, llegará á ser igual á 4,32308, es decir, á una alternativa entera; de suerte, que hallándose unas en un acceso de fácil trasmision, las otras estarán en uno de fácil reflexion. Asi, á esta distancia del cuerpo radiante habrá partículas violadas, intermedias entre las precedentes, que se hallarán en todas las fases posibles de estos dos géneros de accesos. Luego si á esta distancia se halla en su camino un cuerpo reflejante, con tal que su fuerza repulsiva no sea enteramente nula, habrá cierto número de partículas violadas que sufrirán la reflexion, mientras las otras serán trasmitidas.

Este resultado puede hacerse sensible por la misma construccion empleada por Newton para representar las relaciones de los gruesos de los cuerpos con los colores que reflejan, fig. 13. Basta considerar en ella las divisiones 13, 35 de cada línea vertical, como medida de los accesos de las partículas luminosas á que pertenece esta vertical. En el caso particular que representa la figura, el punto comun de donde salen las partículas de luz se halla en la línea CZR, enmedio de un acceso de trasmision, y cada una de las divisiones iguales, comprendidas entre dos líneas transversales cc′, 11′, 11′, 22′... representa la longitud de un semi-acceso. Entonces el número de accesos señalado antes para producir la inversion completa, cae entre la 26.ª y la 27.ª division de la primera columna. Si por este punto se tira una línea paralela al eje ZR, se ve que en efecto corta á la vertical VV′, casi exactamente donde la transversal 24, 2′4′, es decir, que á

esta distancia del punto de salida, las moléculas violadas mas refrangibles han vuelto casi al medio de un acceso de fácil reflexion, mientras las menos refrangibles, que han sufrido una alternativa menor, se hallan aún hácia el medio del acceso de fácil transmision que precede inmediatamente.

Si se repite la misma construccion respecto á otro grueso mas considerable, se hallarán siempre moléculas violadas que estarán en las mismas fases de dos accesos consecutivos, y por consiguiente en estados totalmente opuestos; pero á causa de la prolongacion de los espacios que ocupa cada color, la oposicion se verificará en moléculas comprendidas entre las refrangibilidades estremas.

Sucederá tambien que mas allá de estos límites, una misma paralela podrá pasar por espacios de diferentes órdenes que pertenezcan al mismo color; de suerte que en un mismo grueso habrá en estos diferentes órdenes moléculas que podrán reflejarse, y otras del mismo color que podrán transmitirse. En fin, aumentando siempre el grueso el número de órdenes de cada color que se mezclarán, llegará á ser tan considerable, y tal la prolongacion de los espacios, que presentarán siempre á las fuerzas repulsivas una cantidad sensiblemente constante de luz, cuyas partículas se hallen en todas las fases posibles de ambas suertes de accesos. Desde entonces para cada valor dado de estas fuerzas, la intensidad de la reflexion será constante en todos los gruesos mayores; y hallándose repartidas las moléculas que se presenten entre todas las fases posibles de los diferentes accesos, la cantidad total de luz refleja será igual á la que reflejaría la misma superficie en toda la estension de un solo órden, es decir, en el ancho entero de un solo anillo simple.

Lo que acabamos de decir respecto á las partículas violadas, se aplica del mismo modo á cada uno de los demas colores que ocupan las otras divisiones del espectro. Habrá, pues, relativamente á

cada uno de ellos límites de grueso, mas allá de los cuales el número de partículas reflejas será constante para cada valor de las fuerzas reflejantes, é igual al número total de las que estas mismas fuerzas reflejarian en todo el ancho de un solo anillo simple.

Ahora bien, si se reuniesen todas las cantidades de las siete especies de luz que se reflejan asi en cada anillo simple, se formaria el blanco; será, pues, esta luz la que se refleje por cualquiera superficie reflejante, de cualquiera naturaleza que sea, siempre que esté colocada á una distancia del cuerpo luminoso, bastante considerable para que pueda desplegarse toda la diversidad de los accesos. Ademas, la intensidad de este blanco será constante respecto á cada especie de cuerpo reflejante, cualquiera que sea la distancia á que se coloque; pero será diferente respecto á los diversos cuerpos, segun la mayor ó menor energía que den á su poder reflejante, su naturaleza y la del medio que les rodea.

Estos resultados se hallan confirmados exactamente por la observacion: cuando un rayo de luz ha atravesado un grande espacio de aire, y se le recibe en un cuerpo pulimentado, de cualquiera color que sea, blanco, negro, gris, verde, amarillo, rojo, la parte de luz que se refleja regularmente formando el ángulo de reflexion igual al ángulo de incidencia es siempre blanca. Es cierto que si el cuerpo reflejante es suficientemente denso, refleja tambien una parte de luz colorida que disemina en el espacio hácia todas partes; pero esta misma dispersion anuncia una especie de reflexion diferente de la primera; y en efecto, mas adelante haremos ver por medio de caractéres indudables, que la parte de luz que se refleja de este modo ha penetrado dentro del cuerpo, y se ha reflejado á cierta profundidad de su superficie. No se pueden, pues, aplicar á ellas las solas consideraciones sacadas de la sucesion de los accesos en el primer medio, las cua-

les no pueden convenir sino á las partículas luminosas, cuya reflexion se verifica en este mismo medio por la sola influencia á distancia del cuerpo reflejante. Ahora bien, es un hecho que esta primera reflexion da siempre un rayo del mismo color que la luz incidente, conforme á la teoría, cualquiera que sea la naturaleza del cuerpo reflejante que termina el primer medio.

Para distinguir completamente los caractéres diferentes de estas dos especies de reflexion, póngase el agua mas limpia y la tinta mas negra en dos vasos opacos y teñidos de negro por la parte interior, para que no envien al ojo ninguna luz colorida, mírense despues por reflexion sobre estos dos líquidos las imágenes de los objetos esteriores, y se verán con sus colores ordinarios, sin que se note entre ellas ninguna diferencia sensible de coloracion. He aqui, pues, dos cuerpos, uno de los cuales aparece trasparente y el otro negro, y que sin embargo, reflejan uno y otro todos los colores. Luego el acto de verificarse esta primera reflexion es independiente de la propiedad que tiene el cuerpo de producir en nosotros la sensacion de tal ó tal color. Lo mismo sucederá si en vez de tinta se pone en uno de los vasos, disoluciones de carmín, añíl ó cualquiera otra sustancia colorante: todas estas disoluciones presentarán imágenes enteramente parecidas, y sin embargo, consideradas en masa, la disolucion del carmín aparecerá roja, la de añíl azul, y asi las demas. Es cierto que si estas disoluciones estuviesen muy cargadas llegarian á teñir con sus propios colores las imágenes de los objetos, y tanto mas, cuanto mas concentradas estuviesen; pero esta adicion debilitaria cuando mas la blancura producida por la primera especie de reflexion, sin destruirla, y ordinariamente ni aun llega á alterarla de un modo sensible. Asi es que una barra cilíndrica de lacre del encarnado mas vivo, espuesta á la luz blanca del cielo, refleja en toda su longitud

una línea de luz blanca que aparece siempre en las partes de su superficie, en que los rayos pueden dirigirse al ojo, haciendo el ángulo de reflexion igual al ángulo de incidencia; y la brillantez de esta línea es tal, que en los puntos en que se observa apenas puede distinguirse el color propio del lacre que se manifiesta con tanta viveza en todos los demas.

En todos estos ejemplos las partes de luz incidente que producen los siete colores principales han atravesado un grueso suficiente de un mismo medio, que es el aire, y se hallan todas igualmente dispuestas á reflejarse, lo cual produce la identidad de los colores reflejos *á distancia* por toda especie de cuerpos. Pero cada cuerpo, aplicado al mismo medio, refleja un número mayor ó menor de partículas de cada color, segun las fases de sus accesos en que es capaz de reflejarlos, y de aqui la diferente intensidad de la reflexion en diferentes cuerpos, aunque sea el mismo el color que se refleja. Esta variacion de intensidad puede obtenerse tambien con un mismo cuerpo aplicado á la segunda superficie del medio; bastando para esto adelgazar el cuerpo hasta tanto que su grueso sea menor que la distancia á que son sensibles las fuerzas reflejantes. En este caso, disminuyendo su poder reflejante por las capas que se le quitan, deben sustraerse á su accion parte de las moléculas que antes reflejaba, por estar demasiado separadas del centro del acceso de fácil reflexion para ceder al grado de fuerza que queda al cuerpo. La intensidad de la reflexion que pueda producir irá disminuyendo cada vez mas al paso que se le adelgace; y esto es lo que hemos observado en las bombitas de agua de jabon. Cuando estas son suficientemente delgadas para no reflejar ninguna luz en su segunda superficie, en cuyo caso aparecen enteramente negras, se observa aun en su superficie primera un rayo blanco si lo es la luz incidente, y en general de los co-

lores naturales de los objetos.

Estas reglas constantes, por las cuales se determina la reflexion en todos los casos posibles, segun el estado en que se hallan las moléculas luminosas al llegar á las superficies reflejantes, presentan argumentos para probar que la reflexion no se produce por el choque de las partículas de luz con la materia de los cuerpos. Porque si este choque inmediato fuese la causa del fenómeno, seria tanto mas fácil y frecuente, cuanto mayor fuese el grueso de los cuerpos hasta el término en que llegasen á ser opacos. En este supuesto, si sucediese que en cierto grueso se transmitiesen todas las moléculas de luz, no podria suceder que se reflejasen algunas en menores gruesos. Sin embargo, hemos visto que esto se verifica cuando se ilumina una lámina delgada, de un cuerpo cualquiera, con una sola especie de luz simple; porque si el grueso de esta lámina es variable, se forman en ella por reflexion anillos luminosos, separados unos de otros por intervalos obscuros. Del mismo modo, en la hipótesis del choque no se concebiria cómo un mismo grueso de agua, de aceite, de aire ó de vidrio, espuesto á la luz bajo cierta incidencia, podia presentar bastantes moléculas materiales para reflejar ciertas especies de rayos que transmitiria bajo otra oblicuidad. En fin, no podria tampoco entenderse, por qué cuando dos láminas de vidrio estan en contacto, ó muy próximas á él, no hay en el punto de contacto y á alguna distancia á su al rededor bastantes partículas vítreas para reflejar una cantidad de luz sensible, y sí en otros puntos inmediatos en que esten un poco mas distantes las superficies de las láminas. Todos estos fenómenos, que se esplican perfectamente por la reflexion á distancia, son otras tantas imposibilidades físicas en la hipótesis de un contacto inmediato de las partículas de luz con el cuerpo reflejante.

CAPITULO VII.

Esplicacion de los colores propios y permanentes de los cuerpos.

Habiendo analizado perfectamente la reflexion que todos los cuerpos pulimentados producen fuera de su primera superficie, y manifestado por qué no altera el color de las imágenes cuando se verifica en rayos que acaban de atravesar un medio de bastante grueso, es preciso que examinemos la otra especie de reflexion, por la cual, los cuerpos, apropiándose siempre cierta porcion de luz incidente, la vuelven á esparcir en seguida en el espacio hácia todas partes. Esta porcion, de una tinta particular, constituye el color propio de los cuerpos cuando se observan por reflexion. El resto los atraviesa si son transparentes, mas perdiendo siempre una parte en su sustancia, y la totalidad si los cuerpos son opacos. Tratemos de indagar cómo pueden verificarse estos fenómenos.

Para esto es preciso que nos formemos una idea exacta de la constitucion de los cuerpos, ó á lo menos lo mas cabal que nos pueda proporcionar la observacion de sus propiedades fisicas. Una multitud de esperiencias han manifestado ya que ningun cuerpo es un conjunto continuo de materia, sino que todos estan compuestos de partículas materiales colocadas á cierta distancia, y sostenidas en este estado por las fuerzas opuestas de la atraccion y del color. Estas distancias, invisibles á nuestros sentidos, é inapreciables aun con nuestros mas fuertes microscopios, se hacen evidentes, por decirlo asi, por la transmision de la luz al través de los cuerpos, pues todos, escepto acaso los metales blancos, se dejan atravesar por ella cuando se han adelgazado suficientemente. Esto se puede comprobar poniendo láminas delgadas de cualquiera sustancia delante de un agujerito hecho en el postigo de una

ventana, y dirigiendo á ellas un rayo de luz solar, pues todas parecerán traslucidas si son suficientemente delgadas. Lo mismo se observa mirando estas láminas con el microscopio, é iluminándolas por debajo con una luz viva. Si no podemos por estos medios hacer trasparentes los metales blancos, proviene sin duda de que nuestros medios mecánicos son demasiado groseros para darles el grado de tenuidad necesario; pero á lo menos conseguimos el mismo efecto disolviéndolos, aun con la mayor abundancia en ácidos; lo cual basta para manifestar que su opacidad en el estado sólido no proviene de una propiedad elemental é inherente á sus partículas, sino de su falta de contigüidad, y del grande esceso de su fuerza refringente sobre la del medio que existe entre ella; pues hemos ya observado varias veces que la reunion de estas dos circunstancias basta para producir rápidamente la opacidad multiplicando las reflexiones.

Tambien puede suceder que en los cuerpos que nos parecen mas densos, la capacidad de los intersticios sea millares de veces mayor que el volúmen de las partículas materiales. En efecto, supongamos que las últimas partículas elementales é impenetrables, que constituyen los principios de los cuerpos, esten agrupadas de dos en dos, de tres en tres, de cuatro en cuatro ó en mayor número, de modo que en cada grupo haya entre ellas ciertos intervalos, y que los diferentes grupos formen entre sí intervalos mucho mayores; estos mismos grupos podrán despues considerarse de dos en dos, de tres en tres ó de cuatro en cuatro, formando nuevos grupos, separados entre sí por mayores distancias. Ahóra bien, suponiendo muy densas las moléculas elementales, multiplicando los órdenes sucesivos de grupos, se podrán formar sistemas que ofrezcan todos los grados posibles de densidad. Suponiendo, por ejemplo, que en cada órden, la suma de los espacios comprendidos entre los grupos fuese solo

igual á su volúmen total, un cuerpo que tuviese solo un órden de grupos no contendria mas que la mitad de su volúmen de materia; con dos órdenes no contendria mas que $\frac{1}{4}$; con tres $\frac{1}{8}$; con cuatro $\frac{1}{16}$; con cinco un $\frac{1}{32}$, y asi sucesivamente. Asi es como en los espacios celestes las moléculas de un planeta, aunque separadas unas de otras, forman un grupo de cierta densidad, que constituye el cuerpo del planeta. Muchos planetas, infinitamente separados entre sí con respecto á los intervalos de sus moléculas, pero infinitamente próximos con respecto á las distancias á los demas cuerpos del universo, forman un sistema mas raro, un grupo de un órden mas compuesto. El conjunto de varios sistemas semejantes, separados unos de otros por intervalos infinitos con relacion á las órbitas de cada planeta, formarán otro sistema aun mas raro, tal como el que nos presentan las estrellas nebulosas. Y en fin, se pueden concebir reuniones semejantes de estrellas nebulosas, y asi sucesivamente sin ninguna limitacion.

Reconocido que las partículas de los cuerpos se hallan colocadas á cierta distancia unas de otras, este modo de colocacion es ciertamente el mas general que puede concebirse. Ahora bien, para esplicar cómo pueden tener colores propios semejantes sistemas de grupos, los cuales colores permanecen siempre los mismos, bajo cualquier aspecto, basta admitir como un hecho que hasta los grupos mas compuestos de partículas son muy pequeños, y que ya por su densidad, ya por su naturaleza, refractan la luz con mucha mas fuerza que el medio ó medios que estan interpuestos entre ellos. La primera condicion se halla autorizada por la imposibilidad que hay de distinguir, aun con los mejores microscopios, estos grupos elementales, la segunda es indispensable para que los colores sean permanentes bajo todas las inclinaciones.

Cuando un hacecillo luminoso penetra en un

sistema semejante, se debe concebir desde luego que cierto número de rayos pueden pasar por medio de todos los grupos sin atravesar por ellos y volver á salir al espacio; esta será la parte de luz que el cuerpo puede trasmitir sin alteracion. Las partículas luminosas que la componen no sufren en el interior del cuerpo ninguna nueva modificacion, y por tanto deben seguir en él sin obstáculo la progresion constante de accesos que habian tomado al penetrar. Ahora bien, sin necesidad de exagerar la raridad de la materia en los cuerpos, hay una causa fisica que debe facilitar considerablemente esta especie de trasmision de la luz, y es que todas las particulas muy pequeñas de la materia tienen la propiedad de inclinar lateralmente y á cierta distancia las moléculas luminosas que se acercan á ellas. De suerte que estas, serpenteando asi, pueden pasar libremente por entre las series de partículas materiales que las hubiesen detenido infaliblemente si se hubiesen propagado en una direccion recta.

Sin embargo, debe concebirse tambien que cierto número de rayos encuentran los grupos que forman la sustancia de los cuerpos, y se ven obligados á atravesarlos en este caso, al llegar á la primera superficie de cada grupo, sufren en ella una reflexion parcial; pero su efecto podrá ser muy débil y casi insensible si el grupo es muy delgado, como hemos supuesto. Entonces, penetrando en el grupo las moléculas, y sufriendo su accion, que suponemos muy enérgica, adquirirán accesos mucho mas cortos y de una sucesion mucho mas rápida que los que tenian en el medio esterior. Asi, cuando lleguen á la segunda superficie del grupo, habrá unas que se hallarán en disposicion de reflejarse y otras en la de transmitirse. Las que sufran realmente la reflexion formarán el color propio del grupo, que podrá en muchos casos no tener sino una débil intensidad, á causa de la atraccion de los grupos inmediatos que podrá ser muy enérgi-

ca. Por lo demas este color será el mismo bajo cualquiera incidencia si el poder refrigente del grupo es muy enérgico, como hemos supuesto (1), y si ademas no puede atravesarse sino por su centro de gravedad, impidiendo las fuerzas inflexoras las transmisiones literales. La parte de luz que haya atravesado un grupo de este modo, y se haya sustraido á la reflexion en su segunda superficie, continuará transmitiéndose hasta encontrar otro grupo que vuelva á producir sobre ella otros efectos semejantes. En este caso, si el primer grupo no ha reflejado todos los rayos de la luz incidente, propios para componer su color, el segundo grupo reflejará una parte del resto, y asi sucesivamente de grupo en grupo, hasta que se agote completamente el conjunto de rayos que pueden formar este color en la luz incidente. La suma de estas reflexiones compondrá, pues el color total del cuerpo, que aumentará de intensidad al paso que sea mayor el grueso, mientras los grupos últimos que reciben la luz tengan todavia algo que reflejar.

Considérese ahora la parte de luz, que habiéndose sustraido á todas las fuerzas reflejantes de los grupos sucesivos, se transmite atravesando todo el cuerpo. Si contuviese todos los rayos que no han reflejado los grupos, seria complementaria de su color, y su tinta se hallaria solo un poco debilitada por la parte de luz blanca que puede atravesar el cuerpo sin descomponerse, serpenteando entre los grupos. Pero esta oposicion exacta no se observa jamás rigorosamente en ningun cuerpo, sino que siempre hay una parte de luz de color, que no se halla ni en el color reflejo ni en el color transmitido, y que por consiguiente ha sido absorvida por el cuerpo ó estinguida en su sustancia. Por ejemplo, el oro, reducido á hojitas muy delgadas, es amarillo si se mira por reflexion, y verde si se mira

(1) Lo cual no impide que tal vez sea muy débil el del cuerpo entero.

por transmision: sin embargo, en los anillos reflejos no hay ningun amarillo que tenga por complemento el verde, sino que el color transmitido es siempre un azul, cuyo resultado está conforme con la construccion de Newton para la composicion de los colores. Mas si de este azul, necesariamente compuesto, se quita cierto número de rayos violados y azules, que absorva el oro en su sustancia, restará solo el verde. El progreso de la absorcion es aqui muy rápido á causa de la gran densidad de la sustancia; en otros casos es mas lenta y ordinariamente gradual. Entonces, haciendo variar el grueso del cuerpo por una progresion insensible, se ve que la luz transmitida cambia sucesivamente de tinta, perdiendo primero una especie de color, luego otra, luego otra, hasta que al fin, llegando su intensidad á ser demasiado débil para poderse percibir, el cuerpo aparece enteramente opaco. El órden con que se verifica esta pérdida es determinado respecto á cada sustancia, pero varía segun estas son diferentes. Por ejemplo (1), si en un vaso cónico se pone una disolucion de ciertas maderas de color, y esponiéndola á la luz del cielo se mira por reflexion aparecerá azul; y si se mira por transmision aparecerá amarilla en la parte inferior del vaso, y cerca del cúspide del cono naranjada un poco mas arriba, y en fin, roja en los parages en que es mayor el grueso atravesado por la luz. En este caso los rayos violados y azules se reflejan abundantemente por la disolucion, puesto que hasta las gotas mas pequeñas que pueden separarse aparecen constantemente de esta tinta, y por consiguiente poquísimos rayos de este color podrán penetrar hasta cierta profundidad; los verdes podrán entrar mas fácilmente, y aun mas los amarillos, los naranjados

(1) Newton cita con particularidad una especie de madera que llama *nefritica*. Yo no he podido adquirir ninguna que dé exactamente los colores que él indica; pero un gran número de ellas producen efectos análogos.

y los rojos; colores, que tomados todos juntos, componen el amarillo pálido que se observa por transmision en el fondo del vaso en que el grueso es mas pequeño. Un poco mas arriba, es decir, donde hay que atravesar un grueso algo mayor, quedarán tambien absorvidos los rayos verdes, y el resto compondrá un naranjado. En fin, en un grueso aun mayor se absorverán á su vez los amarillos, despues los naranjados, y últimamente los rojos, si el grueso es suficiente para ello, de donde resultaria un rojo cada vez mas obscuro hasta venir á parar en una entera opacidad. Newton ha citado tambien, por ejemplo, un fenómeno observado por Halley en el agua del mar, dentro del cual habia bajado á la profundidad de algunas brazas un dia que hacia un hermoso sol. La parte superior de su mano, sobre la cual daba el sol directamente á través del agua y de una ventanita cerrada con un cristal, aparecia de color de rosa; y el agua de abajo, asi como la parte inferior de la mano, iluminada únicamente por la luz que esta agua reflejaba, aparecia verde. El primer hecho nos indica desde luego que el agua de mar deja pasar los rayos rojos con mas facilidad que todos los otros. Por otra parte se sabe que refleja con mayor abundancia los rojos violados y azules, pues aparece azul por reflexion en los dias de calma, de donde nació el epiteto de *cæruleum* que le dieron los antiguos. Ahora bien, un objeto colocado en esta agua á alguna profundidad, é iluminado únicamente por la luz transmitida, debe aparecer rojo como la parte superior de la mano de Halley; y este rojo debe ser tanto mas subido y obscuro, cuanto mayor sea la profundidad. Ahora bien, si á cierta profundidad en que han sido ya separados por la reflexion los rayos violados y una parte de los azules, se suprime tambien este rojo de la luz transmitida, como Halley hacia observando la parte inferior de su mano iluminada solo por la luz que se reflejaba en el agua inferior el resto de los

rayos azules; con los verdes y amarillos, que se reflejan de abajo en mayor abundancia, deben necesariamente formar un verde. Por esta teoría se ve que puede haber cuerpos que aparezcan de un mismo color por reflexion y por transmision, pues para esto basta que la luz que reflejan en mayor abundancia sea al mismo tiempo la que los atraviese mas fácilmente; y parece que un gran número de licores rojos presentan esta particularidad, que tambien se observa en algunos vidrios rojos. En fin, si sucesivamente se hace pasar un hacecillo luminoso al través de dos líquidos, de los cuales el segundo refleje la luz que el primero ha transmitido, es evidente que debe obtenerse una completa opacidad, como Hook observó el primero con sorpresa, habiendo colocado uno detrás de otro dos prismas iguales y opuestos, llenó uno de un licor rojo y el otro de un azul, ambos de una tinta muy cargada. No es tampoco imposible que en los cuerpos compuestos la opacidad sea producida por una causa semejante. Por lo demas para tener una idea exacta de las tintas reflejas, y transmitidas por una sustancia cualquiera, el método mas seguro es hacerla atravesar sucesivamente con diferentes gruesos por rayos de luz simple distintos, y medir comparativamente las cantidades que se reflejan y se transmiten de cada uno de ellos. Mas adelante presentaremos métodos para esto, y entonces no faltará mas que componer por medio del cálculo estos elementos simples segun el método de Newton; pero para hacer estas pruebas es necesario servirse de rayos perfectamente simples; porque por poco compuestos que estén, la diferente absorcion que sufrirán sus partes al atravesar la sustancia que se observa, hará cambiar la tinta de la luz incidente. Esta ha sido la causa del error de muchos físicos, como observa Newton, que han creido haber cambiado los colores primitivos de los rayos simples, haciéndolos atravesar medios de color.

Toda esta teoría de los colores permanentes de los cuerpos, está fundada, como se ve, en tres principios fundamentales: 1.º la materia se halla distribuida en los cuerpos, en grupos colocados á cierta distancia unos de otros: 2.º el poder refringente de estos grupos es mucho mayor que el del medio ó medios que los separan: 3.º la reflexion y la transmision de la luz, se verifica en cada grupo, segun las mismas leyes que en las láminas delgadas; el color que despiden proviene de su segunda superficie, y depende de su fuerza refringente y de su grueso.

Estas tres propiedades estan de tal modo unidas entre sí, que concedida la última, las otras dos resultarian necesariamente. Porque si el modo de reflexion es el mismo en los grupos que en las láminas delgadas, es preciso admitir que se hallan separados unos de otros, sin lo cual no se verificaria entre ellos ninguna reflexion, como no se verifica entre dos vidrios de igual naturaleza que se tocan. Será necesario además, que el medio que los separa sea menos refringente que ellos, porque si fuese tanto, el caso seria el mismo que en el contacto, y no se produciria ninguna reflexion en el interior del cuerpo; y si lo fuese mas se le podria aplicar lo que decimos de los grupos, y mirar los intesticios del medio, como la parte reflejante del cuerpo. En fin, será tambien preciso que cada grupo forme un sistema muy refringente, y mucho mas que el medio que le rodea, puesto que los colores de los cuerpos gruesos, pertenecen los mismos bajo cualquiera oblicuidad de los rayos visuales; y hemos reconocido que las tintas reflejas por una lámina delgada bajo diferentes incidencias, varian tanto menos, cuanto mayor es el esceso de su fuerza refringente sobre la del medio que las rodea.

Una grande induccion en favor de esta teoría, es el ver todos los efectos de las partículas insensi-

bles de que se componen los cuerpos, exactamente parecidos á los que observamos en las láminas delgadas sobre una escala bastante grande para poder medir todos sus pormenores. Sin duda se podria, como han intentado algunos sábios célebres, esplicar los colores propios de los cuerpos, y por medio de atracciones y repulsiones químicas que produjesen con preferencia la absorcion ó la repulsion de ciertas tintas; mas entoces seria preciso atribuir á estas fuerzas toda la variedad de efectos, que se esplican con tanta sencillez por medio de los accesos; es decir, que en ciertos órdenes de colores seria necesaria una accion que se estudiase sola á ciertas partículas luminosas, y aun á cierta parte determinada de estas partículas, porque los colores de los cuerpos naturales no son jamas simples, y la teoría de Newton hace ver que no pueden serlo. Por otra parte nada prueba que la afinidad sea capaz de producir esta eleccion de partículas; en vez de que por el ejemplo de las láminas delgadas estamos seguros de que pueden verificarse, y que en efecto se verifican en su segunda superficie por sola la variacion de grueso; y lo que es muy digno de observarse, es, que en todos los cuerpos sólidos y líquidos que se han podido reducir asi á láminas delgadas, el órden y la sucesion de los colores han sido siempre semejantes, independientemente de la afinidad. Siempre hay siete órdenes de anillos sensiblemente distintos, y en seguida la mezcla se confunde formando una blancura uniforme. El paso de las primeras tintas á las últimas se verifica siempre por las mismas gradaciones de grueso, cualquiera que sea la naturaleza de las sustancias reflejantes; ya sea agua, aceite, metal, vidrio, ó aire; los colores producidos en todos estos casos son tan exactamente los mismos, que no hay nadie que pueda distinguirlos. ¡Cuántas analogías para sospechar que las mismas leyes se estienden tambien á la reflexion que se verifica en los grupos materia-

les que componen los cuerpos! Si se quisiesen esplicar por la afinidad los colores de estos grupos, no bastaria suponer á esta fuerza toda la gradacion de intensidad que exigen estos efectos; sino que seria tambien indispensable que en todas las alteraciones producidas por el calor, la luz ó la diferente naturaleza de las sustancias, siguiese fielmente los periódos señalados en la tabla de Newton; porque cuando un cuerpo cambia gradualmente de color por efecto de una accion química cualquiera, bastante lenta para que puedan observarse sus diversos periódos, las tintas por donde pasa siguen siempre exactamente el órden señalado en esta tabla, y que se deduce del de los anillos.

Esta importante ley se observa igualmente en casi todos los progresos de la vegetacion, que tambien pueden considerarse la mayor parte como producto de acciones químicas lentas y graduales. Por ejemplo, Newton ha observado que el verde vivo de las plantas corresponde al tercer órden; y en efecto, el verde de este órden le es perfectamente comparable, en cuanto á la fuerza y limpieza de la tinta, pues es el único que pone estas propiedades en tanto grado en todo el órden de los anillos. Ahora bien, supongamos que á consecuencia de un cambio químico cualquiera, este verde se convierte en rojo, es claro que ha bajado en el órden de los colores; y asi segun la teoría de Newton, esto no ha podido verificarse sin que el color de la hoja haya pasado sucesivamente por el amarillo, el naranjado y el naranjado rojizo. Esto es exactamente lo que sucede á las hojas de las plantas cuando se marchitan, como ha observado el mismo Newton. Aun añadiré yo algo mas general, y es, que examinando las variaciones de las las tintas de un gran número de hojas y flores en los diferentes periodos de su vegetacion, me ha parecido que mientras se desenrolla la fuerza vegetativa, los colores suben en el órden de los ani-

llos, y por el contrario, bajan cuando esta fuerza se debilita. Asi los retoños tiernos de la encina y del álamo blanco, son al principio de un rojo próximo al naranjado, de aqui pasan al naranjado rojizo y luego al verde, pasando antes por una especie de amarillo rojizo muy fugitivo; y este es exactamente el progreso de las tintas que se observan en los anillos, subiendo desde el rojo hasta el verde de tercer órden, como se puede ver por las mismas espresiones usadas por Newton al descubrir los colores de las bolas de agua. He aqui otros ejemplos análogos. Cuando se abre la flor de la madreselva, su color es un blanco puro del primer órden; y á medida que se marchita, pasa á un amarillo pálido, al amarillo, al naranjado y á un naranjado obscuro; que es en efecto el órden de las tintas del primer órden de la tabla de Newton. La flor de geranio sanguíneo, cuyo color es un rojo violado, intermedio entre el 1.° y 2.° órden, se vuelve azul al machitarse despues de haberla cortado. Algunos claveles de un rojo tan vivo que casi ofende á la vista, y que por consiguiente es el del segundo órden, bajan hasta el rojo punzó y al púrpura violado. Lo mismo sucede á ciertas especies de rosas; pero hay otras cuyo color parece ser el rojo del tercer órden; y estas cuando envejecen en el ramo, pierden poco á poco la viveza de su color, y adquiriendo mayor influjo en su tinta el azul y el violado del cuarto anillo bajan al rojo azulado. El color mas inmediato á este en la tabla, es un verde azulado, de suerte que á medida que se acercan á él, presenta una tinta intermedia que es un blanco rojizo é imperfecto (1). Un blanco semejante, intermedio entre el

(1) Las variaciones de grueso en las esperiencias de Newton, aunque dispuestas con mucho conocimiento, eran todavia demasiado rápidas para que se pudiese percibir este blanco imperfecto entre el 3.° y 4.° órden. Hay tambien un blanco análogo en los intermedios de los tres órdenes siguientes. Pron-

cuarto y quinto órden, forma la tinta ordinaria de cierta campanilla, descubierta últimamente por los botánicos franceses. En ella se reconoce aun en el estado mas completo de desarrollo, una ligera mezcla de color de rosa pálido que manifiesta su origen; y asi dejando secar esta campanilla en su ramo ó desecando sus pétalos entre dos papeles; se la ve pasar á un azul pálido, cuya tinta fugitiva precede al azul verdoso del quinto órden de la tabla de Newton. En fin, la flor de tigre, esta hermosa flor que se desarrolla y marchita en pocas horas, parece, cuando aun no está enteramente abierta, de un naranjado rojizo muy vivo; de este color pasa al rojo castaño del primer órden, y últimamente, al marchitarse, pasa al rojo violado del segundo, siguiendo siempre el órden de los anillos (1).

Los mismos periódos se observan en las combinaciones químicas artificiales, cuando se verifican con bastante lentitud para poderse percibir todas las tintas sucesivas de su coloracion. En la obra de Delaval sobre los colores, se halla un gran número de pruebas, aunque no siempre ha interpretado bien los ejemplos que ha elegido. Yo citaré aqui algunos otros. La tintura de tornasol, cuando ha estado mucho tiempo encerrada en un frasco tapado, regularmente se vuelve naranjada, lo cual se atribuye á que se desoxida. Abrase el frasco y quítese el licor para combinarle con el oxígeno del aire, y en pocos instantes pasa al rojo, y despues al azul

to tendremos ocasion de comprobar todos estos resultados en otra clase de fenómenos, en que podremos hacer nacer sucesivamente, y con toda la lentitud imaginable, las tintas consecutivas de los anillos.

(1) El fin rápido de esta hermosa flor se parece á una verdadera putrefaccion. Yo he probado á prolongar su vida manteniéndola en la obscuridad, é impidiéndola abrirse cortando sus estambres y pistilos antes de que se abriese para impedir la fecundacion. Todas estas tentativas han sido inútiles. El dia que debia florecer se abrió á su hora fija, que es como á las cinco de la mañana, y estaba ya marchita á las dos de la tarde.

violado, es decir, del primer órden al segundo. El oxide de manganesa sólido y puro, es de color de castaña; y si se le calienta con potasa, resulta una combinacion sólida, cuyo color es el verde vivo del tercer órden, á la cual llaman los químicos *camaleon mineral.* Esta combinacion es muy poco estable, pues basta disolverla en una gran cantidad de agua caliente, para desunirla al momento, y separar el oxide; pero si se emplea poca agua, y la combinacion está bien hecha, esta separacion es progresiva, y entonces la disolucion cambia sucesivamente de color, pasando del verde al verde azulado, al azul, al purpúreo y al purpúreo rojizo, es decir, que su tinta sube en el órden de los anillos, como si sus partículas se hiciesen mas sutiles. En efecto, me parece que en esta circunstancia, la parte de potasa unida al oxide, es sucesivamente disuelta por la accion del agua, hasta que al fin llega á separarse enteramente del óxide, que queda solo en suspension en el líquido; de donde se puede tambien deducir que el color castaño de este órxide, es un naranjado rojizo del segundo órden, que se ha vuelto escesivamente obscuro, por la absorcion de una gran cantidad de luz. En general, es necesario siempre distinguir cuidadosamente los periodos de intensidad de la marcha de las tintas; porque estas dos clases de fenómenos son absolutamente independientes uno de otro, y siguen leyes enteramente distintas; tanto, que á veces la serie de las tintas determinada por la tabla de Newton, se halla interrumpida de repente por una absorcion total de luz, que hace nula la intensidad, y convierte al color en negro. Hallaremos ejemplos de esto, en una serie de fenómenos, puramente ópticos, pero para no salir de la química, mézclese como ha hecho Mr. de Claubry, aceite de almendras dulces con almidon y ácido sulfúrico, y se obtendrá una combinacion que al principio será amarilla, y que en seguida pasará al amarillo naranjado,

al naranjado fuerte, al rojo y al violado, que es precisamente la serie de los colores de los anillos, yendo del primer órden al segundo. Ahora bien, en el paso del naranjado al rojo, hay un momento en que la absorcion de los rayos incidentes es tan fuerte, que la mezcla parece casi negra. La misma interrupcion se observa substituyendo al aceite de almendras dulces, el que se estrae del alcohol por medio del cloro, y entonces las tintas sucesivas son el amarillo pálido del primer órden, el naranjado, el negro; el rojo, el violado, y en fin, el hermoso azul del segundo órden; donde se ve que la estriccion á que se halla sujeta accidentalmente la intensidad, no impide que el órden de las tintas siga el de los anillos.

Los mismos periódos de coloracion se observan tambien en todas las sustancias reducidas por medio de la precipitacion á polvos muy finos ó á láminas muy delgadas, cuyo grueso varía lentamente, ya por la adicion de nuevas capas de igual naturaleza, ya mas simplemente por una espansion momentánea. Mr. Gay-Lussac ha observado este último caso en un gran número de óxides metálicos, que cambian momentáneamente de color cuando se les calienta, y vuelven á tomar su tinta primitiva por el enfriamiento; y las variaciones de estas tintas, que Mr. Gay-Lussac ha descrito en los *anales de Quimica*, son exactamente conformes al órden de los anillos. El fenómeno inverso se observa, como me ha hecho notar Mr. Chevreul, cuando se volatiliza el añil puro estendido sobre un papel; pues al evaporarse pasa á un rojo punzó muy vivo, lo cual indica que los grupos materiales que le componen se adelgazan, y acaso se subdividen en el acto de la evaporacion. El mismo químico ha tenido la bondad de hacerme presenciar algunos fenómenos curiosos que ha descubierto en la nueva sustancia á que ha dado el nombre de hematina. Esta sustancia, cuando es pura y sólida, tiene un color gris, dificil de fijar

á causa del aspecto metálico de las partículas que la componen, y que acaso esparcen sobre ella este color gris, por la cantidad de luz blanca que despiden por la primera reflexion. De cualquier modo que sea, la hematina disuelta en agua á que se hayan puesto algunos átomos de ácido acético, produce un licor, cuyo color es un amarillo del segundo órden, ligeramente verdoso. Si se introduce este líquido bajo un tubo lleno de mercurio, y se le calienta por la parte de afuera, rodeándole con un yerro caliente, se hace sucesivamente amarillo, naranjado brillante, rojo brillante, rojo punzó, púrpura, y en fin, púrpura muy cargado de azul; y lo que es muy digno de atencion, es que si se deja enfriar, vuelve poco á poco á su primera tinta, pero necesita para ello cierto tiempo, como por ejemplo, algunos dias si la esperiencia se hace con un volumen como de medio centilitro; lo cual hace pensar que la hematina disuelta absorve un poco mas agua al paso que se la calienta, y despues no se separa de ella sino gradualmente. En fin, si se quiere comprobar en cierto modo, con los mismos ojos, el modo progresivo con que las moléculas de los cuerpos llegan á sus colores definitivos, no hay mas que formar en caliente una disolucion saturada de clorate de potasa, y dejarla enfriar con lentitud. Al paso que baja la temperatura, la sal se precipita en laminitas rectangulares muy delgadas que se sobreponen, y se unen unas á otras. Al principio son tan delgadas que aparecen coloridas, y de diferente modo segun la incidencia con que se las mira, y el grueso á que han llegado; las mas gruesas son ya de un blanco uniforme, y las mas delgadas uniéndose unas á otras, llegan tambien á ser blancas, y algunas veces que no se aplican exactamente unas sobre otras, no dejan de reflejar su propia tinta aunque hagan parte de una lámina demasiado gruesa para poder producir colores. Este hecho me le ha comunicado Mr. Gay-Lussac; y yo me he con-

vencido tambien de que sus colores varían segun la incidencia, poco mas ó menos como los de la mica, aunque de un modo un poco mas rápido, pero siempre siguiendo el órden de los anillos. Se observan tambien variaciones de color semejantes y sujetas á las mismas leyes en las lamininitas de tartrite acídulo de potasa que se precipitan de una disolucion de esta sal, saturada en caliente; este otro hecho me ha sido comunicado por Mr. Chevreul. Ahora bien, si se atiende á que en todos estos casos y en los que hemos citado antes, las tintas porque pasan estas sustancias no son nunca simples sino compuestas, y compuestas como las de los anillos, y que varian exactamente por las mismas gradaciones y los mismos periódos, se reconocerá que hay una grandisima analogía, sino una completa identidad, entre los colores propios de los cuerpos y los que las láminas delgadas reflejan en su segunda superficie. Se concebirá tambien, que la sola diferencia de grueso y de fuerza refringente que tienen estas moléculas al pasar por sus dilataciones, condensaciones ó combinaciones diversas, basta para producir todos estos cambios; y aunque pudieran tambien representarse los mismos resultados, por variaciones correspondientes en la afinidad de los cuerpos para con la luz, es preciso convenir en que esta última causa que habria que hacer variar en sus leyes tanto como la primera, no tiene como ella en su favor el ejemplo de las láminas delgadas, y la analogía que resulta de la identidad de las leyes.

Esta analogía se manifiesta igualmente por otros caracteres, en todos los casos en que puede esperimentarse. Hemos reconocido que la especie de los colores reflejos por una lámina delgada, bajo la incidencia perpendicular y bajo todas las incidencias, si la lámina es muy refringente con respecto al medio que la rodea, no depende sino de la naturaleza y grueso de esta lámina, pero no de la

naturaleza del medio circundante, el cual influye solo en la intensidad de la tinta refleja. Luego si los colores permanentes de los cuerpos dependen de la misma causa que los producidos por láminas delgadas, la especie de su tinta no debe variar aunque se les rodee de un medio cualquiera que no tenga bastante accion sobre ello para descomponerlos y alterar sus dimensiones. Esto se observa, en efecto, cuando las sedas, paños, ú otras sustancias semejantes, se embeben en agua ó en aceite. Sus colores se hacen sensiblemente mas obscuros, pero no cambian de naturaleza, y vuelven á adquirir su primera vivacidad, cuando se hace evaporar por el calor, el líquido interpuesto. Lo mismo sucede al añil y al carmin disueltos en el agua. Por muy diferente que sea la disolucion, la naturaleza del color no varía y solo es distinta su intensidad, mas esto prueba únicamente, que la accioñ del agua sobre estas sustancias, no hace mas que separar los grupos materiales que las componen sin tener bastante fuerza para desunir las partes constituyentes de estos grupos. En este caso, aumentando la cantidad de agua en la que se hallan determinados, no se hace otra cosa que separarlos mas, y disminuir asi la cantidad de luz de color que se refleja en un grueso dado; pero esto no influye en nada sobre la tinta, que no puede variar sino por un cambio en las dimensiones, ó en la composicion de los grupos.

Por otra parte hemos visto que los colores reflejos por las láminas delgadas en un mismo medio, se hacen cada vez mas variables y movibles bajo las diversas incidencias, al paso que es menor la fuerza de las láminas refringentes. Debemos, pues, esperar alteraciones semejantes en los colores permanentes de los cuerpos, cuya fuerza refringente tenga poca intensidad. En efecto, asi se observa en los colores variables que presentan las plumas del pavo real, del pichon, del

colibrí (1). Se puede observar tambien que para producir estas variaciones, no es necesario que las barbas de las plumas sean de una estrema tenuidad; porque si los colores que se desenvuelven en ellas se reflejan en una capa muy delgada de sustancia oleoginosa estendida sobre una membrana fina y transparente, como piensa Mr. Chevreul, hasta que esta capa tenga una fuerza refringente distinta de la de sus cubiertas, y probablemente mas enérgica en los casos que examinamos. Asi es, que las láminas gruesas de muriate sobre oxigenado de potasa, presentan colores gradualmente variables bajo diferentes inclinaciones, cuando alguna de las láminas elementales que las componen se halla separada del resto por una pequeña capa de aire ó de agua.

Todos los hechos que hemos presentado en esta discusion, aunque tan diversos en sus pormenores y en las circunstancias en que se producen, pueden reducirse, como se ve, al fenómeno único de los colores que reflejan las láminas delgadas. La idea de referir los colores permanentes de los cuerpos al mismo principio, haciéndolos depender del grueso y de la fuerza refringente de los grupos materiales que los componen, es, pues, enteramente conforme á la analogía; y cuando se considera que esta teoría esplica perfectamente todas las apariencias de coloracion que presentan los cuerpos sin necesidad de suponer una sola propiedad nueva en la materia, casi no puede dudarse de que sea verdadera.

Adoptándola, pues, vemos que las primeras esperiencias de Newton sobre los colores de los cuerpos densos, espuestos á una luz simple en un cuarto obscuro, ofrecen todos los resultados compues-

(1) Los colores que hacen ver los hilos del gusano de seda y de la araña cuando estan iluminados por una luz muy viva han sido atribuidos por Newton á la misma causa; pero es mas verosimil que sean efectos de la difraccion que estos hilos producen en la luz, en razon de su estrema finura, al tiempo de reflejarla.

tos, puesto que la parte de luz enviada por el cuerpo era realmente el producto de las dos reflexiones esterior é interior. Sin esto no podria concebirse como todos los cuerpos cualesquiera que sean aparecen siempre del color de los rayos que los iluminan, porque si se elige por ejemplo, el añil mas puro, el verde mas vivo de las plantas ó el bermellon mas encendido, es claro, segun la tabla de Newton, que la primera de estas tintas, no contendrá casi mas que rayos azules obscuros, con un poco de violado y azul claro; la segunda el verde simple mezclado con un poco de azul claro y amarillo; y en fin, la última el rojo, casi sin mezcla de ningun otro color. Luego si un cuerpo de una de estas tintas se halla espuesto á uno de los rayos simples que no forman parte de ella, sus moléculas nada podrán reflejar, y asi en virtud de esta sola especie de reflexion, el cuerpo apareceria negro; y si aun permanece visible, es en virtud de la reflexion esterior que se ejerce sobre todos los rayos en su primera superficie. Esta analisis de ambos efectos no destruye ninguna de las consecuencias que Newton há deducido en sus esperiencias; porque la reflexion de cada cuerpo deberia ser siempre, como él dice, la mas brillante, cuando se hallase espuesto á la especie de rayos simples que dominaban en su color, y por el contrario deberia ser la mas débil, cuando estos rayos la fuesen estraños. En fin, la inmutabilidad del color de los rayos, cualquiera que fuese la naturaleza ó la tinta del cuerpo reflejante, manifestaba siempre que sus facultades coloríficas eran inherentes á su sustancia. Se ve, pues, que en estas esperiencias, para que la luz refleja fuese absolutamente nula, hubiera sido preciso poder aniquilar el efecto de la reflexion esterior. Mas adelante presentaremos medios de conseguirlo, en cuyo caso los cuerpos pulimentados espuestos á rayos enteramente estraños á su color, deberán aparecer absolutamente negros.

Admitiendo como cierta la teoría anterior, se puede determinar el tamaño de las partículas de color de los cuerpos, cuando se conoce la especie de tinta que reflejan, y la relacion de refraccion con respecto á los rayos que penetran en ellos. El cálculo es exactamente el mismo que hemos indicado en el capítulo 5.º para determinar el grueso de las láminas delgadas, segun su color.

La dificultad está en saber á qué órden pertenece un color observado. He aqui algunos medios por los cuales podrá casi siempre conseguirse este objeto.

Desde luego es menester examinar si el color propuesto varía segun las diversas inclinaciones, y si varía es preciso observar la progresion de tintas que recorre, y comparar su órden con las diferentes partes de la tabla de Newton.

Supongamos que la tinta propuesta sea un hermoso azul bajo la incidencia perpendicular, y que bajando el ojo pase al color de púrpura, no hay entonces duda ninguna de que este azul es del tercer órden, pues solo en este el azul se halla inmediato al púrpura.

Del mismo modo si la tinta propuesta fuese bajo la incidencia perpendicular un naranjado vivo, que degenerase en un amarillo pálido bajo una inclinacion mas oblícua, se inferiria que su color pertenecia al primer órden, único en que el amarillo es pálido y se aproxima al blanco.

Asi hay tintas en los tres primeros órdenes que no se pueden desconocer cuando se han visto una vez; y para formarse una idea exacta de ellas, se deben observar en láminas delgadas de agua, empleando los métodos esplicados en el capítulo 5.º para darles mayor duracion. Tambien pueden estudiarse en láminas delgadas de mica, auxiliándose con las variaciones que sufren bajo inclinaciones diversas, para colocarles en la tabla de Newton. De este modo se adquirirá en poco tiempo un per-

fecto conocimiento de ciertos colores de cada órden, que en seguida servirán como de guias para clasificar todos los demas, lo cual es tanto mas fácil cuanto que teniendo presentes los caracteres de cada órden, no hay nunca que elegir sino entre dos ó tres soluciones.

Por ejemplo, si la tinta propuesta es un verde, no hay duda sino entre el segundo, tercero, y cuarto órden, que son los únicos que contienen este color; mas el verde del segundo órden es muy fácil de reconocer, porque haciendo las veces del blanco que se halla en el primer órden, necesariamente es pálido é imperfecto, y por el contrario los del tercero y cuarto órden son vivos y marcados, sobre todo el del tercero. No habrá, pues, indeterminacion, sino cuando el color propuesto pertenezca á uno de estos, en cuyo caso habrá que decidirse por la observacion de las tintas inmediatas en que degenera, ya por medio de alteraciones químicas, ya variando la inclinacion; porque si el verde propuesto es del tercer órden, deberá mudarse por la diminucion de las partículas que le reflejan en un hermoso azul, ó por su dilatacion pasar á un amarillo verdoso, al amarillo, al naranjado y al rojo; pero si es del cuarto órden no podrá cambiarse sino en verde azulado ó en verde amarillento, sin que pueda manifestarse aisladamente el naranjado ni el amarillo. Por esta razon Newton ha colocado el hermoso verde de la plantas en el tercer órden, por la observacion de las tintas en que se cambia cuando las plantas se marchitan. Del mismo modo si la tinta propuesta es un hemoso azul, no habrá eleccion sino entre el segundo y tercer órden, pues solo en estos se halla el azul separado de los otros colores, de modo que sea puro é intenso; y las alteraciones químicas decidirán despues entre estos dos órdenes. Tómense, por ejemplo, los colores del jarabe de violeta, que los ácidos cambian en un hermoso rojo, y los alcalis en un verde. Es cla-

ro que esta serie de tintas corresponde perfectamente al tercer órden y de ningun modo al segundo; porque si el azul de este sube al rojo, no puede ser sino al rojo del primer órden que es obscuro y castaño, como que es el rojo puro del estremo del espectro; y si baja al verde, perteneciendo este al segundo órden debe ser bajo é imperfecto; caracter que está muy lejos de convenir al que presenta el jarabe de violeta: luego es preciso colocarle en el tercer órden, como ha hecho Newton.

Tambien deben referirse á los rojos de este órden los de las diferentes especies de rosas. El de las rosas ordinarias tiene mucha conformidad con la tinta que Newton ha designado con el nombre de rojo azulado. Sin embargo, se hallan tambien colores vegetales en otros órdenes; por ejemplo, el color de la paja seca es evidentemente el amarillo del primer órden, y el de las azucenas, el blanco del mismo. El color que Newton ha llamado violado en el segundo órden se parece mucho á la parte mas obscura del pensamiento, y esta tinta es la única de su género en toda la serie de los anillos.

El azul del primer órden es siempre muy débil y ligero, porque desde que empieza á manifestarse, propende á debilitarse por la mezcla de todos los demas colores. "Parece, dice Newton, que el azul del cielo debe ser de este órden, porque la naturaleza de todos los vapores es tal, que cuando empiezan á condensarse y unirse en gotitas, adquieren el grueso propio para reflejar este azul, antes de poder presentar ningun otro color. Asi, siendo este el primer color que los vapores empiezan á reflejar, debe ser el color del cielo mas puro y mas transparente, puesto que los vapores no han llegado allí al grueso suficiente para reflejar otros colores, como confirma la esperiencia."

"Respecto al blanco, si es vivo y luminoso en el mayor grado, es el blanco del primer órden, y si es menos vivo y luminoso, es una mezcla de

los colores de los diferentes órdenes. De esta última especie es el blanco del papel, del lienzo y de la mayor parte de los cuerpos blancos. Yo creo que los metales blancos son de la primera especie, porque supuesto que el oro es el metal mas denso, llega á ser transparente reducido á hojuelas muy delgadas, y los demas metales igualmente cuando se hallan disueltos, se sigue que la opacidad de los metales blancos no proviene solo de su densidad. Siendo, como son, menos densos que el oro, serian tambien mas transparentes, si alguna otra causa no concurriese con su densidad á hacerlos opacos, y yo pienso que esta causa es un grueso tal de sus partículas que los hace propios para reflejar el blanco del primer órden; pues si estas partículas son de otro grueso podrán reflejar otros colores, como aparece evidentemente por los que presenta el acero enrojecido al fuego para templarle, y algunas veces la superficie de los metales fundidos, es decir, la escoria que se forma sobre ellos, á medida que se enfrian. Y como el blanco del primer órden es el mas vivo que puede producirse por láminas de sustancias transparentes, debe ser tambien mas vivo en la materia mas densa de los metales que en la materia mas rara del aire, del agua y del vidrio; y yo no veo nada que impida que las sustancias metálicas de un grueso tal, que las haga propias para reflejar un blanco del primer órden, no puedan en razon de su gran densidad reflejar toda la luz que caiga sobre ellas, y ser por consiguiente tan opacas y brillantes como otro cualquier cuerpo. El oro ó el cobre, mezclado con un poco menos de plata, que la mitad de su peso, ó con estaño ó con régulo de antimonio en fusion, amalgamado con un poquito de mercurio, se vuelve blanco. lo cual hace ver que las partículas de los metales blancos, tienen mucha mayor superficie, y por consiguiente, son mas pequeñas que las del oro y el cobre; y ademas que son tan opacas que no pueden

brillar al traves de ella, las partículas del cobre y del oro. Por lo demas, casi no se puede dudar que los colores del oro y del cobre son del segundo y del tercer órden; y por consiguiente, las partículas de los metales blancos no pueden ser mucho mas gruesas de lo que se necesita para que reflejen el blanco del primer órden y la volatilidad del mercurio prueba que no son demasiado gruesas para esto; no pueden tampoco ser demasiado pequeñas, pues si fuese asi, perderian su opacidad y se harian transparentes como lo son cuando estan atenuadas por la vetrificacion ó por la disolucion en ciertos menstruos, ó negras como lo son cuando se hacen muy pequeñas, frotando, por ejemplo, la plata, el estaño ó el plomo contra cualquier otro cuerpo, para trazar en él líneas negras. El primero y único color que contraen los metales blancos por la colision de sus partículas, es el negro. y por consiguiente su blanco debe ser el que confina con la mancha negra en el centro de los anillos coloridos, es decir, que debe ser el blanco del primer órden. Pero si se quiere deducir de aqui el grueso de las partículas metálicas, es necesario contar con su densidad (1); pues si el mercurio fuese transparente, su densidad es tal que, segun mi cálculo, el seno de incidencia sobre este cuerpo, seria al seno de refraccion como 71 á 20, ó como 7 á 2; de donde se sigue que las partículas del mercurio pueden ser tan pequeñas como las de algunos fluidos transparentes y volátiles, y sin embargo, no dejar de reflejar el blanco del primer órden (2).

(1) O para hablar con mas propiedad, con su poder refringente.

(2) Este cálculo supondria que la accion del agua y del mercurio sobre la luz no variaban sino en virtud de la diferente densidad de esta sustancia; pero hemos visto que esto no es asi, y que la naturaleza química influye igualmente. Por lo demas esta suposicion ofrece muy poco inconveniente, no siendo mas que una simple estimacion el uso qué Newton hace de ella.

"En fin, para la produccion del negro, los cuerpecillos deben ser menores que ninguno de los que producen las otras tintas, pues todas las partículas mas gruesas, reflejan demasiada luz para producir el negro. Pero si se suponen las moléculas un poco mas pequeñas de lo que deben ser para producir el blanco, y el azul mas débil del primer órden, segun las observaciones anteriores, reflejarán tan poca luz, que parecerán absolutamente negros; porque podrán romperla diversamente hácia acá ó hácia allá dentro del cuerpo, hasta que se estinga y se pierda, con lo cual estas moléculas aparecerán negras y sin ninguna transparencia en cualquiera posicion del ojo. De este modo se puede comprender por qué el fuego y la putrefaccion, que es el disolvente mas sutil, dan un color negro á las partículas de los cuerpos dividiéndolas; porque cantidades muy pequeñas de cuerpos negros, comunican fácilmente su color hasta un grado muy fuerte á los cuerpos á que se les aplica, pues las partículas de estos cuerpos se aparecen sin trabajo en razon de su gran número, sobre las partículas groseras de los otros cuerpos, porque los cuerpos negros se calientan y consumen por el fuego del sol antes que ningun otro cuerpo, lo cual puede provenir del gran número de refracciones que sufren en un espacio muy pequeño, y en parte de la conmocion que escita con facilidad en partículas tan pequeñas; y últimamente, porque los cuerpos negros tiran al azul de ordinario, como se puede comprobar, haciendo caer sobre un papel blanco una luz refleja por cuerpos negros, pues ordinariamente el papel parecerá de un blanco azulado, lo cual proviene de que el negro confina con el azul obscuro del primer órden, y por tanto refleja mas rayos de este color que de ningun otro."

A estas hermosas observaciones de Newton, puede añadirse una de Mr. Thenard, que parece hecha espresamente para confirmarlas. Habiendo

destilado cuidadosamente siete ú ocho veces el fósforo este químico, con el objeto de obtenerle estremamente puro, halló que despues de estas operaciones habia adquirido una propiedad nueva é inesperada. Si se le disolvia en agua caliente, se hacia transparente y de un color amarillento, como lo es de ordinario, y dejándole enfriar lentamente, volvia al estado sólido conservando este color, y quedaba semi-transparente. Mas si al tiempo que estaba fundido se echaba en agua fria, y se agitaba con un tubo de vidrio, para comunicarle un enfriamiento repentino se hacia opaco y absolutamente negro. Sin embargo, su naturaleza no habia cambiado; porque haciéndole fundir de nuevo volvia á adquirir su transparencia, y su color amarillo que conservaba en el estado sólido, si se le dejaba enfriar lentamente; de suerte, que un mismo pedazo sólido de fósforo, se podia hacer sucesivamente amarillo ó negro, transparente ú opaco, segun se queria. Esta observacion manifiesta del modo mas palpable que la transparencia ó la opacidad, la coloracion ó la privacion de todo color no son otra cosa que modificaciones que resultan de la colocacion y de las dimensiones de las moléculas que componen los cuerpos. Repitiendo esta esperiencia con Mr. Clement, con una cantidad de fósforo que Mr. Thenard nos habia dado, tuvimos ocasion de observar otro fenómeno que hace aun mas notable esta transmision de estado. Habiendo arrojado el fósforo fundido al agua fria, cierto número de globulitos, como diez ó doce, quedaron diseminados hácia diversos puntos, sin perder su liquidez ni su transparencia. Parece que ya por la poca frialdad del agua, ya pôr alguna otra causa, sus moléculas se disponian poco á poco como por efecto de un enfriamiento progresivo; pero si se tocaba uno de ellos con el estremo de un tubo de vidrio, este ligero movimiento, ó acaso el efecto solo de la atraccion de la materia sólida del vidrio, determinaba al momento la consolidacion

del globulillo, y al mismo tiempo se volvia absolutamente negro. Esta prueba, repetida sucesivamente en todos, fue siempre seguida de un mismo efecto; la mas ligera conmocion bastaba para obligar á las partículas á colocarse de uno ó de otro modo. Asi es, como cuando el agua se ha enfriado algunos grados bajo cero, sin dejar de ser líquida, la introduccion de un pedacito de hielo, y yo creo que de cualquiera otro cuerpecillo sólido que pueda ser mojado por el agua aun líquida, produce al momento la congelacion.

Para terminar este capítulo se espondrá una bella esperiencia de Mr. Brewster, que es de las mas propias para confirmar la influencia que la colocacion de las partículas materiales puede tener una infinidad de circunstancias sobre la coloracion. Todo el mundo conoce los colores vivos y brillantes que presenta el nacar de perla, que parece que son propios de esta sustancia, como los de cualquiera otro cuerpo natural; sin embargo, resultan solo de la constitucion de su superficie y de las pequeñas rayas imperceptibles de que está llena, sin tener ninguna relacion con la naturaleza de sus partículas; porque si se señala el nacar, como un sello sobre lacre negro muy fino, sobre la aligacion de Darcet en fusion, ó sobre otra sustancia capaz de amoldarse á sus ondulaciones, las superficies de estas sustancias adquieren la misma facultad que la del nacar, y presentan los mismos colores.

Para completar estas indicaciones sobre los caracteres que distinguen las diferentes tintas de la serie de los anillos, se describirá mas adelante un instrumento que proporcionará el poderlos reproducir todos sucesivamente y de un modo estraordinariamente claro, sobre una escala muy estensa. Este instrumento presentará, pues, un *colorigrado* con el cual se podrán fijar de un modo exacto y comparable los colores de los cuerpos naturales.

CAPITULO VIII.

De la vuelta de los rayos que se reflejan interiormente en la segunda superficie de los medios diáfanos gruesos.

Cuando un rayo de luz despues de haber penetrado oblicuamente en una lámina de superficies paralelas y de un grueso cualquiera, se refleja regularmente en su segunda superficie, y vuelve atrás para salir de nuevo por la primera, la igualdad de su camino en la lámina antes y despues de la reflexion, da orígen á ciertas condiciones que determinan la posibilidad ó imposibilidad de su emergencia. Estas condiciones pueden establecerse de una manera abstracta por los caracteres atribuidos por Newton á los accesos, y comparar sus resultados con la esperiencia. De este modo, los efectos de la reflexion sobre los accesos, se hallan comprobados conforme á las definiciones de Newton; y aplicándolos á las láminas delgadas casi paralelas en que se forman los anillos de colores, se consigue distinguir con claridad lo que sucede antes ó despues de la reflexion interior que los produce.

Hasta aqui hemos considerado rayos que se reflejan de un modo regular formando el ángulo de reflexion igual al de incidencia; pero sabemos que en la superficie de los cuerpos, aun de los mejor pulimentados, se produce otra especie de reflexion que esparce las moléculas luminosas en todas direcciones, y hace visibles los puntos de incidencia desde todas partes de un aposento obscuro. Cuando las moléculas luminosas sufren esta especie de reflexion en la segunda superficie de una lámina gruesa, vuelven á atravesar esta segunda vez, con diferentes inclinaciones de las que tenian al entrar; y por consiguiente, segun la teoría de Newton debe cambiar el tamaño de los accesos, y cambiar des-

igualmente, segun las nuevas direcciones que tomen; de suerte, que si las mas al llegar á la primera superficie de la lámina se hallan dispuestas á transmitirse, otras por el contrario estarán en estado de reflejarse; y la manera con que se reparten entre estos dos estados en las diferentes direcciones de reflexion, hará conocer las modificaciones que sufren las longitudes de los accesos. No se trata, pues, mas que de realizar esta especie de fenómenos y de darle una forma comparable, que es lo que ha hecho Newton con un cuidado digno de la importancia del objeto; y la parte de la óptica en que ha espuesto estos nuevos descubrimientos, es una de las mas bellas y de las mas desconocidas de su obra.

LIBRO SÉPTIMO.

DE LA POLARIZACION DE LA LUZ.

Consideraciones generales.

Cuando las moléculas luminosas atraviesan cuerpos cristalizados dotados de la doble refraccion, sufren diferentes movimientos al rededor de su centro de gravedad, los cuales dependen de la naturaleza de las fuerzas que ejercen sobre ellas las partículas del cristal. Algunas veces el efecto de estas fuerzas se limita á disponer todas las moléculas de un mismo rayo paralelamente unas á otras, de suerte que sus superficies homólogas se hallan dirigidas hácia los mismos lados del espacio. Este fenómeno es el que Malus ha designado bajo el nombre de *polarizacion*, comparando el efecto de estas fuerzas con la de un iman que hiciese colocar en una misma direccion los polos de una serie de agujas magnéticas. Cuando se verifica esta disposicion, las moléculas de luz la conservan en toda la estension del cristal, y no sufren ya ningun movimiento al rededor de su centro de gravedad; pero hay otros casos en que las moléculas que atraviesan el cristal no se fijan en una posicion constante, sino que todo el tiempo que tardan en atravesar el cuerpo, oscilan al rededor de su centro de gravedad con velocidades y periódos calculables. En fin, algunas veces giran sobre sí mismas con un movimiento de rotacion continuo. El objeto de las investigaciones contenidas en este libro tienen por objeto el establecer por medio de esperiencias directas, la existencia de los diferentes movimientos que acabamos de indicar,

el probar que estos movimientos se continuan á profundidades muy sensibles en el interior de los cuerpos, y hacer conocer las leyes principales.

Esta especie de investigaciones debe su orígen á los trabajos de Malus; que ha abierto á los físicos una nueva carrera tan rica y tan fecunda, que habiendo ya entrado en ella, y encontrado el hilo de los fenómenos, los descubrimientos se presentan por sí mismos á cada paso. Asi, antes de todo espondremos las propiedades fundamentales que ha reconocido en las acciones de los cuerpos sobre la luz, y describiremos los instrumentos necesarios para observarlas y medirlas con exactitud; y en seguida daremos á conocer todo lo que se ha añadido á sus descubrimientos.

CAPITULO PRIMERO.

Métodos generales para producir la polarizacion fija.

El principal descubrimiento de Malus consiste en dar á los rayos de luz una modificacion tal, que las moléculas que componen un mismo rayo se sustraigan juntas á la reflexion cuando se les presenta á las superficies reflejantes por ciertos lados y bajo ciertas incidencias determinadas.

Para presentar un ejemplo, supongamos que un rayo solar SI, fig. 1, cae sobre la primera superficie LL de un plano de vidrio pulimentado, formando con este plano un ángulo de 35° 25′, este rayo se reflejará en II′ haciendo el ángulo de reflexion igual al ángulo de incidencia. En este punto cualquiera de su camino, recíbase en otro plano de vidrio L′ L′ igualmente pulimentado, donde sufrirá otra segunda reflexion parcial. Pero esta segunda reflexion será nula, si el segundo plano de vidrio forma tambien un ángulo de 35° 25′ con la recta II′, y está colocado de modo que la segunda reflexion se forme en un plano II′ L′ perpendicular

al plano SIL en que se ha formado la primera.

A fin de hacer comprender mejor la disposicion de los dos vidrios, supongamos que II′ es una línea vertical, y que el primer plano de reflexion sea el meridiano; entonces el segundo plano de reflexion II′ L′ será el plano vertical que pasa por los puntos Este y Oeste.

Antes de entrar en las consecuencias de este curioso esperimento, vamos á dar á conocer algunos pormenores acerca del modo de hacerle cómodamente y con exactitud.

Se pueden inventar muchos instrumentos apropiados á este objeto; mas el que yo acostumbro usar es el que representa la fig. 2, el cual es muy sencillo, y basta para todas las esperiencias de la polarizacion. Se compone de un tubo TT′ en cuyos dos estremos se colocan dos piezas TTT, T′T′T′, que pueden girar, aunque con bastante fuerza, y cada una de ellas tiene una division circular que marca los grados. De los dos puntos opuestos de su circunferencia, parten dos varitas de cobre TV, T′V′ paralelas al eje del tubo, entre las cuales está suspenso un anillo de cobre AA que puede girar al rededor de un eje XX perpendicular á la direccion comun de las dos varillas. El movimiento de este anillo se mide igualmente por una division circular, y se fija donde se quiere por medio de tornillos de presion. Cuando se quiere presentar una lámina á los rayos de luz, se aplica á la superficie del anillo y se fija en ella, y en seguida se la pueden dar todas las situaciones imaginables con respecto al rayo de luz que pasa por el eje del tubo; porque girando circularmente al rededor de este la pieza T ó T′ conduce el plano de reflexion al azimut que se quiera; y el movimiento del anillo sobre el eje XX proporciona el poder presentar la lámina al rayo incidente bajo todas las inclinaciones. La division que arregla este movimiento debe marcar cero cuando el plano del anillo es perpendicu-

lar al eje del tubo, y las divisiones de las piezas T, T′, deben marcarle en una misma línea recta paralela á dicho eje. Por consiguiente antes de emplear el instrumento es preciso asegurarse de qué se verifican estas condiciones.

Si, por ejemplo, se quiere repetir la esperiencia de Malus que acabamos de presentar, se colocará un vidrio en cada anillo, y se dispondrán de modo que cada uno forme un ángulo de 35° 25′ con el eje del tubo, y se colocará la division de una de las piezas T, T′ en 0 y la otra en 90°, á fin de que sean rectangulares los planos de reflexion. Hecho esto se fijará el tubo y se colocará á alguna distancia una vela encendida, cuya posicion se variará, hasta que uno de los rayos emanados de ella se refleje en la direccion del eje TT′, lo cual sucederá cuando mirando por el tubo se vea la imágen de la llama por reflexion en el primer vidrio. Dispuestas las cosas de este modo, el rayo reflejo encontrará tambien el segundo vidrio bajo el mismo ángulo de 35° 25′; y entonces segun las diferentes posiciones que se dan á la pieza T′T′ que sostiene este vidrio, el rayo que proviene de la segunda reflexion tendrá distintas intensidades, y habrá dos posiciones opuestas en que llegará á ser enteramente nula, á lo menos sino se atiende solo á la parte de luz que los vidrios reflejan de un modo regular. Es preciso tener cuidado de colocar un cuerpo negro detrás del vidrio L′L′ al lado opuesto á la luz refleja, para interceptar los rayos estraños que pudieran venir por este lado desde los objetos esteriores, y que atravesando el vidrio y llegando al ojo, se mezclarian con los rayos reflejos que se pueden observar. La misma precaucion debe tomarse respecto al primer vidrio LL; y aun, como este no se emplea nunca sino para la reflexion que se verifica en su primera superficie, se puede pintar su superficie posterior con tinta de china, ó esponerla al humo de una lámpara, pero jamas se debe cubrir esta

superficie con cosa metálica, por una razon que veremos mas adelante.

En vez de emplear la llama de una bugía como cuerpo luminoso, puede emplearse la luz natural, que entre en el tubo despues de haberse reflejado en el primer vidrio LL; pero en este caso es preciso limitar el campo que comprende el tubo, colocando en su interior algunos diafragmas de una abertura muy pequeña. Es necesario tambien, colocar como antes un paño negro debajo del vidrio reflejante, ó aun mejor cubrir su superficie posterior con una capa de tinta de china para detener los rayos que pueden venir por refraccion de los objetos colocados debajo. De este modo, cuando se mire por el tubo, estando dirigido hácia el cielo el vidrio LL, se verá un pequeño espacio perfectamente blanco y brillante, con el cual se podrán hacer todas las esperiencias. Esta perfecta blancura presenta una gran ventaja, y aun es indispensable en un gran número de casos en que es necesario comparar diversas tintas, lo cual no puede conseguirse nunca tan bien usando de la llama de una bugía ó de cualquiera otra sustancia abrasada, porque jamas es blanca ninguna de estas llamas. En fin, es preciso generalmente moderar la viveza del rayo incidente, de modo que no sea sensible la parte que se refleja en ambos vidrios de un modo irregular, porque hallándose esta parte despues de la reflexion en el estado de luz radiante, no puede polarizarse; solo la otra parte que ha sufrido una reflexion regular puede sufrir la polarizacion, y por consiguiente solo ella se sustrae á la reflexion en el segundo vidrio.

Por lo demas, cualquiera que sea el instrumento que se adopte, el método será siempre el mismo, y se observarán los mismos fenómenos de reflexion en el segundo vidrio. Para esponerlos de un modo metódico que proporcione el poder abrazar fácilmente su conjunto, supondremos que el plano

de incidencia SIL del rayo, coincide con el plano del meridiano, y que el rayo reflejo II′ es vertical. Entonces, si se hace girar la pieza T′ T′ que sostiene el segundo vidrio, este girará tambien al rededor del rayo reflejo, formando siempre con él un mismo ángulo; y el plano en que se verifique la segunda reflexion, se dirigirá necesariamente hácia diversos puntos del horizonte, segun sea diferente el *acimut*. Esto supuesto, he aqui los fenómenos que se observarán.

Cuando el segundo plano de reflexion se halla en la direccion del meridiano, y por consiguiente coincida con el primero, la intensidad de la luz refleja en el segundo vidrio es la mayor posible.

Esta intensidad disminuye al paso que girando el segundo plano se separa de ser paralelo al primero.

En fin, cuando el segundo plano de reflexion se halle en el plano vertical que pasa por Este y Oeste, y por consiguiente, es perpendicular al primero, la intensidad de la luz refleja es absolutamente nula en las dos superfiicies del segundo vidrio, y la luz la atraviesa totalmente.

Si se continua haciendo girar la pieza T′T′ mas allá del primer cuarto de círculo, los fenómenos se repiten en un órden inverso, es decir, que la intensidad de la luz crece precisamente como habia disminuido, y llega á ser la misma á igual distancia del plano vertical de Este y Oeste. Por consiguiente, cuando el segundo plano de reflexion vuelve á hallarse de nuevo en el meridiano, se llega á un segundo *maximum* de intensidad, semejante al primero. Entonces la superficie reflejante del segundo vidrio ha descrito al rededor del rayo una semicircunferencia, y le recibe por la superficie contraria á la que presentaba al principio. Pasado este término, si se continúa haciendo girar el vidrio la intensidad de la luz refleja, varia exactamente como al otro lado del meridiano; disminu-

ye al paso que se separa de este plano de reflexion, llega á ser enteramente nula en el plano vertical, y vuelve á aumentar hasta el meridiano, donde llega de nuevo á su primer maximum.

Se ve pues, que en la rotacion completa del vidrio la intensidad de la luz refleja tiene dos *maximum* correspondientes al azimut 0 y al 180° y dos *minimum* correspondientes al azimut 90° y 270°; y que al rededor de estos diferentes las variaciones son las mismas en todos los cuadrantes. A todas estas condiciones se satisface suponiendo que la intensidad es proporcional al cuadrado del coseno del ángulo que forma el segundo plano de reflexion con el primero.

Reunidos asi los resultados de esta hermosa observacion bajo un solo aspecto, sacaremos esta consecuencia general, que el rayo reflejo por el primer vidrio no se refleja en el segundo bajo esta incidencia, cuando llega á él por sus puntos Este y Oeste; pero se refleja, á lo menos en parte, cuando se presenta por cualquiera otro de sus puntos opuestos. Ahora bien, considerando el rayo como una sucesion infinitamente rápida de una serie de moléculas luminosas, sus superficies no son sino la continuacion de las superficies de las moléculas. Será, pues, necesario inferir que estas tienen superficies dotadas de distintas propiedades físicas, y que en la circunstancia actual, la primera reflexion ha hecho volver hácia los mismos puntos del espacio, las superficies, sino semejantes, á lo menos igualmente dotadas de la propiedad de que se trata. Esta colocacion de las moléculas es lo que Malus ha llamado *polarizacion de la luz*, comparando el efecto del primer vidrio al de un iman que hiciese dirigir los polos de una serie de agujas hácia un mismo punto.

Hasta aqui hemos supuesto que el rayo, ya incidente, ya reflejo, formaba con los dos vidrios un ángulo de 35° 25′, y en efecto, solo formando este

ángulo se verifica completamente el fenómeno. Si sin alterar la inclinacion del rayo sobre el primer vidrio, se hace variar un poco su inclinacion sobre el segundo, la intensidad de la luz refleja no llega á ser nula en ningun azimut, pero es la mas débil en el plano vertical de Este y Oeste, donde antes era nula. Si por el contrario, sin alterar la inclinacion del rayo reflejo sobre el segundo vidrio, se hace solo variar su incidencia sobre el primero, se hallará tambien que este rayo, al caer sobre el segundo vidrio no le atraviesa totalmente; sino que sufre tanto en la primera como en la segunda superficie una reflexion parcial, que si se ha variado poco el primer vidrio, tendrá su minimum en el vertical de Este y Oeste.

Tambien se producen fenómenos semejantes, sustituyendo á los vidrios láminas pulimentadas formadas la mayor parte con sustancias diáfanas. Para esto, los dos planos de reflexion deben formar siempre entre sí ángulos rectos, pero es preciso presentar las láminas á los rayos luminosos bajo diferentes ángulos, segun su naturaleza y la del medio que los rodea, y por el cual llega la luz. Segun la sustancia de la lámina refracta *mas* que este medio, ó lo *mismo* ó *menos*, el ángulo de polarizacion contado desde la superficie comun es *menor* que 45°, ó *igual* ó *mayor*; y se acerca tanto mas al primero ó al último límite cuanto mayor es la diferencia de las relaciones de refraccion en el sentido que conviene á cada uno de ellos. Por ejemplo, cuando la reflexion se verifica en la primera superficie de un vidrio pulimentado, y rodeado de aire, hemos visto que el ángulo de polarizacion tomado desde dicha superficie era de 35° 25′; pues solo seria de 32° si el vidrio se reemplazase por una lámina de sulfate de barita, y en el diámetro se reduciria á 23°. Substitúyase ahora al aire aceite de trementina, que refracta casi lo mismo que el vidrio; entonces el ángulo de polarizacion, tanto en la primera

como en la segunda superficie del vidrio, diferirá muy poco de 45°. En la segunda superficie se supone que la reflexion se verifica en el medio que limita el vidrio. Supongamos que este medio sea el aire; entonces la incidencia interior en el vidrio, contada siempre desde la superficie, será mayor de 45° para que la polarizacion sea completa. En efecto, es de 57° 25′ 30″, y seria de 72° 21′ 50″ á la emergencia del diamante. Segun una observacion muy curiosa de Mr. Brewster, la incidencia de la polarizacion completa es siempre exactamente ó con muy poca diferencia tal, que el rayo reflejo es perpendicular al rayo refracto. Los ángulos determinados conforme á este dato, se hallan perfectamente de acuerdo con los resultados de la esperiencia, y satisfacen á los límites que hemos señalado antes; pues representando por SI, IR, IR′, fig. 3, 4 y 5, los rayos incidentes, reflejos y refractos, que se deducen asi en los tres casos que hemos visto, se ve bien que el ángulo de polarizacion SIA, tendrá con el de 45° las relaciones de diferencia ó de igualdad que hemos enunciado conforme á la esperiencia. La ley se aplica igualmente á las sustancias que solo producen una polarizacion incompleta como el diamante y el azufre; y entonces el ángulo indicado por la construccion es aquel en que resta menos luz no polarizada en el rayo reflejo.

El método de observacion que hemos aplicado á los vidrios pulimentados, es el que se emplea generalmente, y puede servir para probar que cuando la polarizacion es completa, es siempre una modificacion perfectamente idéntica, cualquiera que sea la sustancia que la determine. Porque cuando se han dispuesto dos láminas de una misma sustancia, de modo que el rayo que se refleja en la primera se sustraiga enteramente á la reflexion sobre la segunda, se puede sustituir en vez de esta, un vidrio pulimentado, que colocado con respecto al

rayo reflejo como en nuestras primeras esperiencias, por él. Recíprocamente se puede reemplazar la 1.ª lámina por un vidrio pulimentado que reciba los rayos incidentes bajo un ángulo de 35° 25′, y el rayo reflejo que produzca se sustraerá completamente á la reflexion de la segunda lámina en las circunstancias correspondientes á la sustancia de que esta lámina está formada. En fin, las variaciones de intensidad del rayo reflejo, segun el diverso azimut de la segunda lámina, están sujetas á las mismas leyes.

Cuando un rayo de luz ha recibido la polarizacion en cierto sentido por los métodos que acabamos de describir, lleva consigo esta propiedad, y la conserva sin alteracion sensible aunque se le hagan atravesar gruesos bastante considerables de aire, de agua, y en general de las sustancias que producen la refraccion simple (1); pero las que producen la doble refraccion alteran generalmente la polarizacion del ojo y de un modo, al parecer instantáneo; para comunicarle otra nueva de igual naturaleza, pero en distinto sentido; y solo en ciertas direcciones de la seccion principal puede evitar el rayo esta influencia perturbatriz. Tratemos de ocupar mas de cerca estas dos especies de acciones.

Cuando un rayo emanado naturalmente de un cuerpo luminoso, cae perpendicularmente sobre un romboide de espato de Islandia, se divide siempre en dos rayos emergentes, de igual intensidad con corta diferencia; uno de los cuales sufre la refraccion ordinaria y el otro la estraordinaria. Mas estos dos rayos despues de su salida se halla que gozan de una propiedad que los disminuye esencialmente de la

(1) Digo, *en general*, porque hay sustancias no cristalizadas, y aun líquidos que alteran la polarizacion, en virtud de ciertas fuerzas propias de sus partículas, é independientes de su modo de agregacion. Mas adelante trataremos de este fenómeno.

luz directa, pues si caen perpendicularmente sobre la superficie de otro romboide, se dividen de nuevo ó permanecen sencillos, segun el ángulo que forma su seccion principal con la del primero (1). Cuando se dividen, la intensidad se reparte entre ellos desigualmente segun los diferentes valores de estos ángulos. Estos fenómenos los hemos indicado ya al tratar de la doble refraccion; mas para espresar ahora sus leyes con toda claridad, llamemos F_o el rayo ordinario emergente del primer cristal, y F_e el rayo emergente estraordinario; y consideremos los periódos de su separacion en el segundo cristal, prescindiendo de la luz que se pierde por la reflexion parcial que se verifica en ambas superficies del cristal. Empezemos por el rayo F_o. Este se dividirá generalmente en dos, uno F_{oo} sujeto á la refraccion ordinaria del segundo cristal, y otro F_{oe} sujeto á la refraccion estraordinaria del mismo. El primero F_{oo} será igual á F_o cuando sea nulo el ángulo formado por las secciones principales, y entonces contendrá él solo toda la luz transmitida. Partiendo de este término, su intensidad disminuirá á medida que aumente el ángulo de las dos secciones principales, y llegará á ser nula, cuando este ángulo sea recto. Por el contrario, el rayo F_{oe} será nulo cuando las dos secciones principales sean paralelas, é irá aumentando al mismo paso que el ángulo que aquellas formen hasta llegar á su maximum cuando sean perpendiculares una á otra, y entonces siendo nulo el otro rayo F_{oo}, llegará F_{oe} á ser igual á F_o; y los mismos fenómenos se reproducirán siguiendo igual órden en los demas cua-

(1) Como emplearemos con frecuencia la espresion de seccion principal, no parecerá inútil recordar que en la teoría de la doble refraccion, se llama asi el plano que pasa por el eje de un cristal, perpendicularmente á la superficie por donde este rayo entra ó sale. En los romboides de espato de Islandia, este plano corta las superficies naturales por una línea que divide en dos partes iguales los ángulos obtusos de estas superficies.

drantes. Es muy fácil comprobar estos resultados por la esperiencia, pues basta tener dos romboides de espato de Islandia, bastante puros, á fin de que los rayos de luz puedan atravesarlos de un modo regular, y bastante pulidos para que la intensidad de la luz no se debilite demasiado en sus superficies. Se hace en un papel blanco un punto con tinta bien negra, y cuando está seco se coloca sobre él uno de los dos romboides. Entonces, si se coloca el ojo verticalmente, se ven dos imágenes del punto negro, en la direccion de una recta paralela á la diagonal mayor del romboide; como se demuestra en la teoría de la doble refraccion. Estas dos imágenes tienen sensiblemente la misma intensidad, y la línea que las une gira al mismo paso que se hace girar el cristal. Si sobre este se coloca el otro romboide de modo que todas sus superficies sean paralelas á las del primero, aun no se verán mas que dos imágenes del punto negro, aunque mas distantes entre sí que anteriormente. Pero si se hace girar poco á poco el romboide superior á fin de separar una de otra las dos secciones principales, cada imágen se dividirá en dos, y se debilitará á causa de esta division. Esta debilidad se hará mas sensible á medida que aumente el ángulo de las dos secciones principales, y en fin, cuando se hallen formando entre sí un ángulo recto, las primeras imágenes habrán desaparecido enteramente. Si se continúa haciendo girar el romboide superior, se reproducirán los mismos fenómenos en todos los cuadrantes, segun hemos dicho anteriormente. Ahora bien, si se comparan estos fenómenos con los que presentan los vidrios cruzados bajo la inclinacion de 35° 25′ se ve que el rayo reflejo en el segundo vidrio es enteramente análogo al rayo F_{oo}, pues ambos varian siguiendo exactamente los mismos periódos, produciendo en un todo los mismos efectos el ángulo de los dos planos de reflexion que el de las dos secciones principales. La analogía es aun mucho mayor de la que aparece por estas fórmulas;

pues no solo consiste en los periodos de la variacion de intensidad, sino que es absolutamente idéntica la naturaleza de las modificaciones que reciben los rayos por estas dos diversas operaciones. Este precioso descubrimiento, debido tambien á Malus, se prueba por las esperiencias que vamos á esplicar.

Cuando á un rayo de luz, que ha sido polarizado por la reflexion, cayendo sobre un vidrio pulimentado bajo una inclinacion de 35° 25′ se le hace atravesar perpendicularmente un romboide de espato de Islandia, se verifica en él lo mismo que si hubiese sufrido ya la refraccion ordinaria en otro romboide, cuya seccion principal fuese paralela al plano de reflexion. Si la seccion principal del romboide que se le presenta es paralela á este plano, el rayo no se divide, y todas las moléculas que le componen sufren en este romboide la refraccion ordinaria. Si la seccion principal se separa del plano de reflexion, el rayo se divide en dos al penetrar en el romboide, uno de ellos análogo á F_{oo} y otro á F_{oe}, pues el uno sufre la refraccion ordinaria, y el otro la extraordinaria. Este último, muy débil al principio, aumenta la intensidad á medida que la seccion principal del romboide forma un ángulo mayor con el plano de reflexion; al mismo tiempo disminuye la intensidad del rayo ordinario, y en fin, llega este á ser nulo cuando la seccion es perpendicular al plano, en cuyo caso el rayo estraordinario contiene todas las moléculas transmitidas. En una palabra, cuando un rayo de luz ha sido modificado de este modo por la reflexion sobre un vidrio, tiene todos los caractéres de un rayo ordinario F_o formado por la transmision por un romboide, cuya seccion principal fuese paralela al plano de reflexion. Si se quiere comprobar esto por medio de la esperiencia, es preciso emplear un romboide bastante grueso, para que los dos hacecillos en que se divide el rayo polarizado sean bien distintos y puedan observarse separadamente, ó lo que es lo mismo, es necesario dismi-

nuir el diámetro del hacecillo reflejo hasta que esta separacion se verifique en el romboide de que se puede disponer. Pero como adelgazando de este modo el rayo reflejo disminuye su viveza, y por otra parte es muy dificil hallar romboides gruesos bien puros, se evitan todos estos inconvenientes empleando un prisma de espato calcáreo de un pequeño número de grados, cuya superficie anterior sea una de las superficies naturales de un romboide. Por este medio, se hace mas considerable la separacion de los dos hacecillos emergentes, y á causa de la pequeñez del ángulo refringente del prisma, sus intensidades son con corta diferencia las mismas que si se hubiese empleado un romboide perfecto. Para hacer las esperiencias del modo mas exacto y mas cómodo, acromatizo este prisma colocando detrás de él otro prisma de crown-glass de un ángulo conveniente y opuesto al primero, fijo todo ello en el centro de un anillo circular adoptado á una alidada que gira sobre un círculo de cobre graduado, y coloco este aparato perpendicularmente á la direccion del rayo reflejo, cuya descomposicion quiero observar, por ejemplo, perpendicularmente al tubo TT de la fig. 2. Entonces recibiendo la luz del cielo en el primer vidrio AA que forma con el eje del tubo un ángulo de 35° 25′, y se suprime el segundo vidrio basta hacer girar la alidada que sostiene el prisma cristalizado, para observar del modo mas claro y cómodo la division del rayo reflejo, asi como los diferentes periódos de intensidad de los hacecillos en que se resuelve al artravesar el prisma. Estos periódos son los mismos, si se sustituye al primer vidrio, cualquiera otra lámina capaz de polarizar completamente la luz, colocándola bajo el ángulo en que produce este fenómeno; y este resultado es una consecuencia evidente de que las propiedades comunicadas á los rayos reflejos son las mismas en todos estos casos.

Acabamos de analizar por la refraccion de un

cristal la luz que la reflexion ha polarizado; recíprocamente puede analizarse la luz modificada por un cristal, sujetándola á la reflexion, como tambien lo ha hecho Malus. Ha colocado verticalmente la seccion principal de un romboide de espato calcáreo; y despues de haber dividido un rayo de luz por medio de la doble refraccion, ha hecho caer los dos hacecillos dimanados de él sobre un vidrio pulimentado, de modo que formasen un ángulo de 35° 25′ con su superficie, y que el plano de incidencia fuese paralelo á la seccion pricipal del romboide. El rayo ordinario ha sufrido la reflexion parcial como si hubiese sido un hacecillo de luz directa; pero el estraordinario ha penetrado enteramente dentro del vidrio y le ha atravesado como si de antemano hubiese sido polarizado por la reflexion en un plano perpendicular á la seccion principal del romboide.

Estas esperiencias prueban que un rayo de luz polarizado por la reflexion sobre un vidrio, se halla modificado exactamente del mismo modo, que si hubiese refractado *ordinariamente* en un romboide de espato de Islandia, cuya seccion principal fuese *paralela* al plano de reflexion; ó como si hubiese sido refractado *extraordinariamente* en un romboide cuya seccion principal fuese *perpendicular* á este mismo plano; de suerte que es imposible reconocer ninguna diferencia entre las disposiciones comunicadas á las moléculas de luz por uno ú otro de estos métodos.

Aun hay mas: estas disposiciones pueden producirse igualmente por todos los cristales que tienen la propiedad de la doble refraccion. Todos estos cuerpos, cualquiera que sea su naturaleza química, pueden comunicar á la luz la facultad de refractarse en otro cristal en dos hacecillos ó en uno solo, segun la posicion de su seccion principal. Para esto no es necesario ni aun que los cristales sean de una misma especie; uno pudiera ser por

ejemplo, de carbonate de plomo ó de sulfate de barita, y el otro de espato de Islandia; el primero podria ser un cristal de roca, y el segundo un cristal de azufre. Todas estas sustancias obran unas sobre otras relativamente á la division ó no division de los rayos, como obrarian dos romboides de espato de Islandia; y la condicion que hace al rayo refractarse en el segundo cristal en dos hacecillos ó en uno solo no depende mas que de las posiciones respectivas de los ejes de los cristales que se emplean, cualesquiera que sean sus principios químicos y las superficies naturales ó artificiales en que se verifica la refraccion. Todos estos resultados han sido descubiertos por Malus, aunque á la verdad solo ha podido enunciarlos por induccion, porque no conociéndose entonces aun las dos especies de doble refraccion atractiva y repulsiva, no podia señalar con seguridad cuál era el rayo ordinario y cuál el estraordinario.

Para hacer sensibles estas condiciones de divisibilidad, hacia Malus observar la llama de una bugía al través de dos prismas de un ángulo muy pequeño, formados de diferentes materias que produjesen la doble refraccion, y colocados uno sobre otro. De este modo se obtienen generalmente cuatro imágenes de la llama; pero si se hace girar poco á poco uno de los prismas al rededor del rayo visual, las cuatro imágenes se reducen á dos, siempre que las secciones principales de las dos superficies contiguas son paralelas ó rectangulares. Las dos imágenes que desaparecen no vienen á confundirse con las otras, sino que se las ve estinguirse poco á poco, al paso que aumenta la intensidad de las otras. Cuando las dos secciones principales son paralelas, una de las dos imágenes está formada por todos los rayos que se refractan ordinariamente en los dos prismas, y la otra por las que se refractan estraordinariamente. Cuando las dos secciones son rectangulares, una de las imágenes está formada por los

rayos que se refractan ordinariamente en el primer cristal, y estraordinariamente en el segundo; y la otra al contrario de los que se refractan estraordinariamente en el primero, y ordinariamente en el segundo. Yo he comprobado que estas propiedades se verifican siempre, ya sea la doble refraccion de los cristales de una misma naturaleza, ya de naturaleza diferente.

Los fenómenos nos conducen, pues, á reconocer una perfecta identidad entre la modificacion que la reflexion comunica á los rayos bajo cierta incidencia, y la que les dan los cuerpos cristalizados dotados de la doble reflexion. Ademas vemos que esta modificacion se refiere á los lados de los rayos, que aparecen desigualmente susceptibles de ser atacados por las fuerzas reflejantes y por las que producen la doble refraccion. Para fijar estas propiedades por medio de caractéres geométricos, consideremos un rayo II′, fig. 6, polarizado por la reflexion en un vidrio LL; y en cada una de las moléculas que le componen, tiremos tres ejes rectangulares *cz*, *cx*, *cy*, el primero de los cuales *cz* esté en la direccion del movimiento de traslacion de las moléculas; el segundo *cx* en el plano de reflexion SIc, perpendicularmente al primero; y el último perpendicular á los otros dos. En este caso, cuando el rayo II′ encuentre un segundo vidrio L′L′, dispuesta de modo que no le refleje, las fuerzas reflejantes, emanadas perpendicularmente de este vidrio, serán tambien perpendiculares al eje *cx*, y ademas obrarán del mismo modo sobre la parte de las moléculas situada hácia *cx* y sobre la parte situada hácia *cx′*, puesto que separando un poco el vidrio de la posicion en que la reflexion es nula, sus efectos son simétricos á una y otra parte de esta posicion. Asi la accion de las fuerzas reflejantes *bajo esta incidencia* no podrá hacer girar el eje *xcx′* ni á derecha ni á izquierda, al modo que la gravedad no puede hacer girar una palanca horizontal, cuyos

dos brazos son iguales. No podrán, pues, dichas fuerzas conducir este eje á su propio plano, como se halla en la primera reflexion, por la cual se ha verificado la polarizacion en el vidrio LL. Esto nos manifiesta que de este eje dependen las propiedades de las moléculas luminosas, y por consiguiente le llamaremos *eje de polarizacion*, suponiendo su direccion determinada en cada molécula de un modo semejante é invariable. Ademas, para abreviar, llamaremos á cz *eje de traslacion*; pero este no le supondremos invariable en cada molécula, sino solo como relativo á su direccion actual, á fin de dejar á la molécula la libertad de girar al rededor de su eje de polarizacion. Segun estas definiciones, todos los resultados que hemos obtenido hasta ahora podrán enunciarse con mucha sencillez y claridad del modo siguiente:

Cuando un rayo de luz se refleja en una superficie pulimentada, bajo la incidencia que produce la polarizacion completa, el eje de polarizacion de todas las moléculas reflejas está situado en el plano de reflexion, y es perpendicular al eje actual de traslacion de estas partículas.

Si las moléculas incidentes se hallan colocadas de modo que sea imposible el verificarse esta condicion, no se reflejarán, *á lo menos bajo la incidencia que determina la polarizacion completa.* Esto sucede cuando el eje de polarizacion de las moléculas incidentes es perpendicular al plano de incidencia, estando determinado el ángulo de incidencia de un modo conveniente.

En general, cuando una superficie bruñida recibe un rayo polarizado bajo la incidencia en que ella produciria la polarizacion completa, y se la hace girar al rededor de este rayo sin alterar su inclinacion respecto á él, la cantidad de luz que refleja en sus diferentes posiciones es proporcional al cuadrado del coseno del angulo que forma en su superficie el plano de incidencia con el eje de la polarizacion.

Cuando la luz atraviesa romboides de espato de Islandia que la dividen, las moléculas luminosas se polarizan diversamente. Las que componen el rayo estraordinario tienen su eje de polarizacion en un plano tirado por el eje de traslacion de este rayo y por una recta paralela al eje del cristal. Las que componen el rayo estraordinario tienen su eje de polarizacion perpendicular al plano tirado del mismo modo por su eje de traslacion y por una recta paralela al eje del cristal.

Segun esto, cuando digamos que un rayo de luz está *polarizado ordinariamente con relacion á un plano*, querrá esto decir que las moléculas que le componen tienen su eje de polarizacion situado en este plano, ó bien, para abreviar aun mas, diremos que este es el *plano de polarizacion*; y por el contrario, cuando digamos que el rayo está *polarizado estraordinariamente con relacion á un plano*, querrá decir que las moléculas de luz que le componen tienen su eje de polarizacion perpendicular á este plano.

Cuando un rayo de luz ya polarizado atraviesa perpendicularmente un romboide de espato de Islandia, la cantidad de luz que pasa en el estado de rayo ordinario es proporcional al coseno del ángulo formado por la seccion principal del romboide con el eje de polarizacion del rayo; y la cantidad de luz que pasa en el estado de rayo estraordinario es proporcional al cuadrado del seno del mismo ángulo. Una y otra especie de polarizacion se refieren al plano de la seccion principal.

La reflexion y la doble refraccion no son las únicas circunstancias propias para determinar la polarizacion fija, sino que se produce tambien en la refraccion causada por los cuerpos no cristalizados. Este fenómeno ha sido descubierto y descrito á un mismo tiempo por Malus y por Mr. Biot (1): pero solo Malus ha descubierto su ley y dado su analisis. Aqui le

(1) Las esperiencias de Malus y de Biot han sido leidas

espondré yo por medio de las esperiencias que me le han hecho conocer; porque le hacen muy visible y fácil de observar. He aqui en lo que consiste.

Si se forma una pila de muchas láminas de vidrio paralelas, separadas entre sí por intervalos de aire, y se presenta oblicuamente esta pila á un rayo de luz natural, la luz transmitida se halla modificada en todo ó en parte como si hubiese atravesado un cuerpo cristalizado; porque si se analiza este rayo á su salida, haciéndole atravesar un romboide de espato de Islandia, se divide generalmente en dos hacecillos de diferente intensidad; y aun aumentando bastante el número de vidrios sobrepuestos hay cuatro posiciones rectangulares del romboide, en las cuales no se divide, y entonces la luz transmitida obra como si estuviese completamente polarizada en un solo sentido.

Este fenómeno no se verifica solo en una incidencia particular del rayo sobre las láminas de un vidrio, sino que empieza desde que la incidencia deja de ser perpendicular; la parte de luz transmitida que conserva los caractéres de la luz directa disminuye á medida que el rayo incidente se hace mas oblicuo sobre las láminas; en fin, si estas son suficientemente numerosas en comparacion á la intensidad del rayo incidente, se llega á un término en que, como hemos dicho, toda la luz transmitida está polarizada en un solo sentido; y llegado una vez á este término, subsiste en adelante la misma propiedad respecto á las demas oblicuidades, al paso que el rayo incidente se acerca mas á ser paralelo á los vidrios.

El número de láminas necesario para obtener asi la polarizacion completa, depende de la intensidad de la luz incidente y de la naturaleza de la sustancia de que se componen las láminas. Diez láminas de vidrio bastan para polarizar completamen-

en el instituto el 11 de Marzo de 1811, y publicadas pocos días despues en el monitor.

te la luz del sol al ponerse; mas dos hojas de oro batido son suficientes para producir el mismo efecto á cualquiera altura que se halle el sol; pero es necesario tener cuidado de que estas hojas ó estas láminas esten colocadas á cierta distancia y paralelamente unas á otras. Tambien se polariza la luz de este modo con láminas fluidas, como las que se pueden formar con agua de jabon introduciendo en ella un carton cortado interiormente; pero es muy dificil formar simultáneamente un número suficiente para que la polarizacion sea total.

Cuando se emplea un gran número de láminas de vidrio, por ejemplo 40 ó 50, y se les hace obrar sobre la luz emanada de la llama de una bugía, se observan grandísimas diferencias entre las intensidades de la luz transmitida bajo diferentes oblicuidades. Esta intensidad, muy débil al principio, bajo la incidencia perpendicular, aumenta á medida que el rayo incidente se hace mas oblicuo respecto á las láminas, y llega á su maximum cuando forma con ellas un ángulo de 35°, 25′, que es el ángulo en que la reflexion sobre el vidrio polariza completamente la luz. Pasado este término, y aumentando siempre la oblicuidad, la intensidad disminuye de nuevo, y aun con mayor rapidez que la que tenia al aumentar.

Detengámonos un momento en este maximum. En él se polariza enteramente la luz refleja por las láminas sucesivas; y segun lo que hemos visto antes al analizar el fenómeno de la reflexion, se polariza de modo que el eje de polarizacion de las moléculas luminosas se halla en el plano de reflexion. Ahora bien, si bajo esta misma incidencia se duplica ó triplica el número de láminas que componen la pila, luego que la luz transmitida se halla polarizada completamente, su intensidad no varía en nada, y conserva absolutamente el mismo brillo, cualquiera que sea el número de láminas: es preciso, pues, que entonces se halle polarizada de modo que

se sustraiga á la reflexion contínua y sucesiva que las láminas procuran ejercer sobre ella. En efecto, si se separa la última lámina á una distancia suficiente para poder observar la reflexion que produce, se ve que es absolutamente nula. Esto nos manifiesta el sentido en que entonces se halla polarizada la luz; porque para transmitirse libremente al través de las láminas sucesivas, es preciso que esté polarizada perpendicularmente al plano en que se verifica la refraccion. Aunque esta consecuencia se presenta por sí misma con arreglo á los principios espuestos, Mr. Biot no la habia deducido de los fenómenos, y pertenece á Malus, que la ha descubierto por otro camino, analizando primero separadamente el efecto de una sola lámina, y en seguida el de muchas láminas sucesivas.

Tambien se observan fenómenos de polarizacion fija en los cuerpos luminosos, aun cristalizados, cuando la luz los atraviesa en la direccion de sus capas. Las fuerzas que producen estos fenómenos son entonces independientes de la cristalizacion elemental, y modifican sus efectos.

Por ejemplo, todo el mundo sabe que la piedra llámada ágata está formada de capas cuarzosas, sobrepuestas sucesivamente por infiltracion. Si se corta una lámina de esta sustancia, perpendicularmente á sus capas, se halla que polariza paralelamente á su superficie una gran parte de la luz que la atraviesa, y aun toda ella si es suficientemente gruesa, ó si no es muy intenso el rayo de luz á que se presenta. Esta observacion se debe á Mr. Brewster. De aqui resulta que si se espone la lámina á un rayo polarizado en la direccion de sus venas, no puede hacer girar ninguna de sus moléculas luminosas en el sentido necesario para transmitirlas, y por consiguiente detiene toda la luz. Por el contrario, si el plano de polarizacion es paralelo á las venas de la ágata, las moléculas luminosas se hallan dispuestas naturalmente como las colocaria la accion

de la ágata, y por consiguiente el rayo se transmite, aunque debilitándose en razon de ser la trasparente imperfecta. Si se vuelve la ágata de modo que pase de una de estas posiciones á la otra, la intensidad de la luz transmitida disminuye gradualmente; pero se ha observado que estos fenómenos no se verifican sino pasando de ciertos límites de grueso. Cuando la ágata es bastante delgada admite con una facilidad sensiblemente igual todas las moléculas luminosas, cualquiera que sea el sentido de su polarizacion, y adquiere todas las propiedades de los cristales que producen la doble refraccion. Mas adelante daremos las pruebas de este hecho. Admitiéndole por ahora se ve que es necesario distinguir en la ágata dos especies de fuerzas polarizantes distintas, una dependiente del modo de cristalizacion de sus partículas, y otra de la colocacion y heterogeneidad de las capas de que está formada (1).

Tambien se han descubierto propiedades análogas en la turmalina, y aun son mucho mas singulares; porque cuando la turmalina es pura, el ojo no descubre en ella ninguna apariencia de capas heterogéneas, pues entonces es muy limpia, y parece que únicamente su color, que por lo regular es un verde obscuro, se oponga á su diafanidad. Sin embargo, si se talla una turmalina de modo que forme un prisma, cuyas aristas sean paralelas á su eje, y se mira por él un objeto delgado, como por ejemplo, una aguja, acromatizándole con otro prisma de vidrio, para mayor facilidad, se hallará que la parte mas delgada de la turmalina transmite dos imágenes refractas de la aguja, las cuales, volviendo de un modo conveniente la superficie de incidencia, pueden llegar á tener una intensidad casi igual; pero si se desvia poco á poco el ojo para conducir el

(1) Mas adelante veremos que hay una combinacion semejante en el sulfate de cal, que es tambien una sustancia luminosa, aunque sus capas se hallen bastante inmediatas entre sí para producir una perfecta claridad.

rayo visual hácia la parte mas gruesa, se ve debilitar gradualmente una de las dos imágenes hasta desaparecer enteramente. La otra imágen continúa transmitiéndose con sola la disminucion de intensidad que debe resultar de la falta de trasparencia; y si se estudian las moléculas luminosas que la componen, se halla que estan polarizadas perpendicularmente á las aristas del prisma, las cuales son paralelas al eje de cristalizacion. Asi, la turmalina tallada en este sentido, produce la doble refraccion cuando es delgada, y la simple cuando es gruesa; pero la que conserva es la refraccion estraordinaria, como puede comprobarse por un medio muy sencillo que indicaremos despues.

Esta propiedad da lugar á otros muchos fenómenos, que es fácil preveer cuando se conocen, pero que parecerian estravagantes si estuviesen aislados.

Supongamos que se han pulimentado las dos superficies opuestas de una turmalina, de modo que formen una lámina de superficies paralelas, cuyo grueso sea de algunos centésimos de milímetro; si esta lámina se espone perpendicularmente á rayos que emanen de un cuerpo luminoso sin ninguna polarizacion anterior, por ejemplo, á la llama de una bugía, toda la luz transmitida se halla polarizada en un solo sentido perpendicularmente al eje de la turmalina. Esta obra, pues, sobre las moléculas que la atraviesan, de modo que las vuelve en esta direccion. Asi es que cuando se presentan estas láminas á un rayo polarizado, cuyo plano de polarizacion es perpendicular á su eje, le transmiten; pero si este plano es paralelo á su eje detienen el rayo totalmente. Pasando de la primera posicion á la segunda, la transmision se debilita gradualmente á medida que se vuelve la lámina, permaneciendo siempre perpendicular la incidencia. De aqui resulta que si se sobreponen dos de estas láminas, de modo que sus ejes se crucen en ángulo recto, el punto de interseccion es siempre opaco, cualquiera

que sea la especie de luz incidente y las modificaciones que se le hayan comunicado de antemano; porque la segunda lámina detiene necesariamente los rayos transmitidos por la primera.

Estos fenómenos no se verifican sino cuando el grueso de las láminas escede de ciertos límites, que varían segun su claridad y la intensidad de la luz á que se les espone. Adelgazándolas mas empiezan á transmitir algunos rayos polarizados en la direccion de su eje; y en fin, teniendo un grueso aun menor, transmiten estos rayos casi tan bien como los otros, y entran entonces en las leyes ordinarias de todos los cristales que producen la doble refraccion.

Volviendo á tomar el prisma de turmalina acromatizado que nos ha servido en nuestras primeras esperiencias, se descubre en él otra propiedad muy digna de atencion, á saber, que las dos imágenes de un objeto blanco, vistas por su parte mas delgada, no aparecen del mismo color. La ordinaria, que es la que desaparece cuando el grueso es mayor, es verde amarillenta; y la estraordinaria, que es la que debe subsistir, aparece sensiblemente blanca. Esta esperiencia se puede hacer con la luz blanca del cielo polarizada por reflexion sobre un vidrio negro, ó con la luz radiante de un alfiler blanco; el efecto es siempre el mismo. La blancura de la imágen persistente y la coloracion de la otra manifiestan que este fenómeno no proviene de una reparticion desigual de las moleculas luminosas entre las dos refracciones ordinaria y estraordinaria, como podria creerse á primera vista; pues entonces la imágen permanente deberia tener un color complementario del de la otra. La alteracion de esta es, pues, posterior á la division de la luz entre las dos refracciones; y de aqui resulta que la sustancia de la turmalina absorve mas facilmente las moléculas violadas y azules, que son las primeras que faltan en esta imágen, cuando estan polarizadas paralelamente á su eje que cuando lo estan perpendicularmente.

En general la especie de accion que las láminas de turmalina ejercen sobre la luz las hace muy cómodas para determinar fácilmente y sin equivocarse en qué sentido se halla polarizado un rayo, pues no hay mas que buscar el sentido en que le detienen, y entonces el eje de la lámina será paralelo al eje de polarizacion. Se puede hacer esta prueba fácilmente en un rayo que se haya polarizado á propósito por reflexion en un sentido conocido.

Si se analizan así las dos imágenes de un objeto, vistas por un prisma de espato de Islandia, tallado paralelamente al eje de cristalizacion, se halla que la imágen mas separada está polarizada paralelamente á este eje, y la mas inmediata lo está perpendicularmente á él. Lo contrario se observa en un prisma de cristal de roca tallado del mismo modo; la imágen mas distante está polarizada perpendicularmente al eje, y la mas próxima paralelamente. Esto consiste en que la doble refraccion del espato de Islandia es repulsiva, y atractiva la del cristal de roca. En razon de esta circunstancia la imágen ordinaria sufre en el prisma de espato la refraccion mas fuerte, y en el de cristal de roca la mas débil. Vemos, pues, que tanto en uno como en otro, esta imágen se halla polarizada paralelamente al eje de cristal, y la estraordinaria perpendicularmente. Lo mismo sucede en todos los cristales, sea atractiva ó repulsiva su doble refraccion. Podemos, pues tomar esta circunstancia como un carácter para reconocer cuál imágen es la ordinaria y cuál la estraordinaria por el solo exámen de su polarizacion; y este carácter podrá tambien servirnos para determinar si un cristal dado es atractivo ó repulsivo, sin necesidad de formar con él un micrómetro de dobles imágenes, pues bastará cortar un prisma paralelo al eje, y observar el sentido de polarizacion de las imágenes vistas por él. Si la mas distante está polarizada paralelamente al eje del prisma la refraccion ordinaria es la mayor y el cristal

es repulsivo; si esta misma imágen se halla polarizada perpendicularmente al eje, el cristal es atractivo. La lámina de turmalina es muy cómoda para este objeto.

Por medio de una lámina semejante se puede comprobar fácilmente un hecho que Mr. Arago ha descubierto por otros métodos, á saber, que en el fenómeno de la reflexion la parte de luz esparcida indistintamente en todos sentidos, se halla en gran parte polarizada perpendicularmente al plano de emergencia. Para comprobarlo no hay mas que introducir un rayo solar en un aposento obscuro, dirigiéndole á la superficie de un cuerpo cualquiera diáfano ú opaco, y colocándose en seguida en cualquier punto fuera de la direccion de la reflexion regular, mirar al punto de incidencia por una lámina de turmalina. Haciendo girar poco á poco esta lámina al rededor de los rayos reflejos irregularmente, se percibirá en la intensidad de la imágen una variacion sensible. Aparecerá con el mayor brillo cuando la turmalina deje pasar los rayos polarizados paralelamente á la superficie de incidencia, y con el menor cuando detenga estos mismos rayos. Esto se verificará de cualquier punto que se mire el punto de incidencia, y por consiguiente en cualquiera plano de emergencia que se coloque el observador. De donde resulta que la luz que refleja irregularmente en cualquiera de estos planos contiene una porcion dominante de partículas polarizadas en el sentido que les es perpendicular, como si la diseminacion de esta luz fuese producida por una refraccion muy oblicua, segun cada plano de emergencia.

Mr. Biot ha repetido esta esperiencia en la superficie esterior de muchos romboides de espato de Islandia, colocando el plano de incidencia del rayo en diferentes sentidos relativamente á la seccion principal, lo cual se verificaba haciendo girar el cristal sobre sí mismo. La parte de luz polarizada en el sentido

de la superficie, en virtud de la reflexion irregular, ha permanecido siempre la misma. De donde ha inferido que aunque esta especie de reflexion se verifica en moléculas luminosas que han penetrado las primeras capas del cristal, se produce sin embargo á profundidades en que no son aun sensibles las fuerzas que resultan de la cristalizacion. Ya hemos visto que otro tanto sucede con la reflexion regular; pero como esta se verifica fuera del cristal habia menos motivo de admirarse.

CAPITULO II.

De los periodos en que se verifica y acaba la polarizacion en los cuerpos cristalizados dotados de la refraccion doble.

En todas las esperiencias de doble refraccion que hemos esplicado hasta aqui hemos hallado siempre los dos rayos ordinario y estraordinario polarizados en dos direcciones rectangulares que Malus nos ha enseñado á determinar. En efecto, estas son las disposiciones definitivas que toman los ejes de las moléculas luminosas en el interior de los cristales, y cuando llegan á adquirirlas las conservan ya á cualquiera otra profundidad mas considerable. Pero yo he llegado á descubrir que las moléculas no se colocan de este modo repentinamente al entrar en el cristal, sino que lo hacen progresivamente y á profundidades tanto mayores, cuanto menor es la fuerza atractiva ó repulsiva que obra sobre ellas; de suerte que variando de un modo oportuno la direccion del rayo incidente con relacion al eje de que emana la fuerza, se puede hacer sensible esta profundidad, y aun apreciable por medio de nuestras medidas. Hasta entonces el sentido de la polarizacion, aunque es regular, no es fijo. Las moléculas luminosas, al paso que se adelantan, hacen mover sus ejes como por una especie de oscilacion, á

un lado y otro de los planos en que deben fijarse definitivamente. Llamaremos á este estado *polarizacion movible*, dando el nombre de *polarizacion fija* al estado definitivo de las moléculas.

Una hermosa observacion de Mr. Arago sobre las láminas delgadas de mica y de sulfate de cal condujo á Mr. Biot á este resultado. Aquel físico, habiendo espuesto dichas láminas á un rayo polarizado, y mirado por un prisma de espato de Islandia la imágen transmitida que resultaba, notó que se resolvia en dos hacecillos de distintos colores, cuyas tintas variaban unas veces regular y otras irregularmente, mas siempre segun el grueso de las láminas y su situacion con respecto á los ejes de las moléculas luminosas que las atravesaban. Tales eran los efectos de la polarizacion movible, como veremos despues. Mr. Arago halló tambien que resultaban colores análogos cuando la luz polarizada habia atravesado algunas láminas gruesas de cristal de roca y aun de flint-glass. Estos eran tambien efectos semejantes, solo que las fuerzas que los producian eran tan débiles, que la polarizacion movible podia sostenerse en todo el grueso de las láminas; debilidad que provenia en el cristal del sentido en que estaba tallado, y en el flint-glass de un principio de cristalizacion.

Para descubrir las leyes de estos fenómenos es indispensable observarlos con un aparato tal, que proporcione el poder presentar las láminas cristalizadas en todas las posiciones que se quieran respecto á los ejes de las moléculas luminosas, por ejemplo, el que hemos descrito en la pág. 134. Un rayo polarizado por la reflexion en un vidrio cae perpendicularmente sobre un prisma romboidal de espato de Islandia acromatizado y movible sobre un círculo graduado. Se coloca al principio el prisma de modo que la luz transmitida produzca únicamente la imágen ordinaria, en cuyo caso la seccion principal del prisma se halla paralela al plano de pola-

rizacion del rayo (1), y despues se interpone la lámina cristalizada, fijándola en una posicion conocida en el segundo anillo A′ A′ del aparato. Entonces su accion, como cristal, desvia generalmente los ejes de cierto número de partículas luminosas, hace nacer en el prisma romboidal una imágen estraordinaria; y observando las circunstancias en que desaparece esta imágen, asi como los periodos de intensidad por donde pasa en las diferentes situaciones de la lámina y del romboide, se llega á determinar el nuevo sentido de polarizacion comunicado al rayo de luz. Tambien se puede substituir al romboide otro segundo vidrio colocado de suerte que el rayo polarizado por el primero no sufra la reflexion en su superficie. Entonces, interponiendo la lámina cristalizada entre ambos vidrios, la reflexion volverá á aparecer sobre el segundo y la observacion de las fases que sufra hará conocer como antes el nuevo sentido de polarizacion comunicado por la lámina á los ejes de las moléculas luminosas. En este caso es preciso añadir al aparato un tercer anillo graduado, en el cual pueda fijarse la lámina en posiciones conocidas.

En fin, como todos los fenómenos de polarizacion que un cristal puede producir, se hallan ligados á la fuerza, ya atractiva, ya repulsiva que produce la doble refraccion, es indispensablemente necesario conocer la direccion del eje en las láminas que se quieren emplear. Las leyes de la polariza-

(1) Para distinguir fácilmente esta posicion de la que da tambien una sola imágen, pero estraordinaria, es bueno emplear un prisma, cuyas caras laterales conserven aun la forma del romboide de que se han hecho. Porque sabiéndose que en un romboide de espato de Islandia, la seccion principal es paralela á la diagonal pequeña, conservará esta misma direccion si el que talla el prisma se limita á inclinar un poco la cara posterior del romboide. Observando, pues, con un prisma semejante la division de las dos imágenes, se verá cuál es la que subsiste cuando la diagonal pequeña es paralela al plano primitivo de polarizacion, y esta será la imágen ordinaria.

cion movible nos presentarán mas adelante medios muy prontos y sencillos para conseguirlo; pero hasta entonces debemos limitarnos á los que ofrecen los fenómenos de la polarizacion fija. Ahora bien, segun estos fenómenos, cuando un rayo polarizado atraviesa una lámina cristalizada gruesa y de superficies paralelas, hay solo dos posiciones, en las cuales conserve enteramente su polarizacion primitiva, á saber: 1.° cuando la seccion principal de la lámina es paralela al plano primitivo de polarizacion del rayo; en cuyo caso este atraviesa enteramente la lámina en el estado ordinario: 2.° cuando la seccion principal es perpendicular al plano de polarizacion; en cuyo caso el rayo pasa enteramente en el estado estraordinario. Luego si habiendo hecho esta doble esperiencia en una lámina cristalizada se hacen en ella dos secciones en estos dos sentidos, una de ellas será necesariamente la seccion principal, y por consiguiente contendrá el eje de doble refraccion. Fórmense entonces en la lámina, paralelamente á estas dos secciones, dos nuevas superficies; y determínense en ellas las direcciones en que el rayo refracto conserva su direccion primitiva, y una de estas direcciones será necesariamente el eje del cristal. Para decidir entre ellas no hay mas que formar prismas, en los cuales una de sus caras sea perpendicular á esta direccion, y ver cuáles son los que dan las imágenes simples, pues este es el carácter del eje, como hemos visto al tratar de la doble refraccion.

Este método ha sido inventado por Malus; y Mr. Biot le ha aplicado á la determinacion del eje del sulfate de cal. La facilidad de procurarse esta sustancia, su estructura en hojas, que facilita el formar láminas sumamente finas, de un perfecto pulimento, de una cristalizacion regular y homogénea, y en fin de un grueso mucho mas igual que el que podria dar el arte, son ventajas que concurrian grandemente al objeto que se habia propuesto de su-

getar á medidas precisas la accion progresiva de las láminas cristalizadas. Esta es la razon por qué se ocupó al principio de esta sustancia.

La forma primitiva señalada por Mr. Haüy al sulfate de cal es un prisma recto cuadrangular, cuyas bases, situadas en el plano de las láminas, son paralelogramos oblicuángulos, siendo los ángulos obtusos de 113° 7′ 48″, y los agudos de 66° 52′ 12″. La teoría de la cristalizacion no determina la relacion de longitud de los lados, y eligiéndola de modo que represente las formas secundarias con la mayor sencillez posible, que es el objeto del mineralogista, Mr. Haüy ha tomado la relacion de 12 á 13. Yo me he convencido de que el eje de doble refraccion del sulfate de cal no tiene ninguna relacion de simetría con este paralelogramo; pero si se triplica el lado 12 dejando constante el otro, de modo que se forme un nuevo paralelogramo cuyos lados sean entre sí como 36 á 13, el eje de doble refraccion coincide con su diagonal mayor; de suerte que forma con el lado 36 un ángulo de 16° 13′; lo cual basta para hallar su posicion en una lámina cualquiera de sulfate de cal por la de los lados del paralelogramo, la cual es muy fácil reconocer, puesto que la lámina se rompe naturalmente en estas direcciones. Siendo puramente gráficos, y tales como indica la teoría de la doble refraccion, los medios que yo he empleado para descubrir la posicion de este eje, nó he podido llegar desde luego á la exactitud que acabo de señalar; pero hallándose todos lós valóres que obtenia entre 16° y 17°, los ha hecho exactós sujetándolos á la direccion de que el eje de doble refraccion se hallase colocado simétricamente, sino en el paralelogramo señalado por Mr. Haüy á lo menos en uno de sus múltiplos.

Para comprobar estos resultados, he cortado prismas de sulfate de cal, en los cuales una de las caras era perpendicular á la direccion del eje determinado, como acabo de decir, y la

otra oblicua á dicha direccion. Mirando una aguja muy fina por este prisma, estando vuelta hácia el ojo la superficie perpendicular al eje, se veía una sola imágen de la aguja colorida por la dispersion; en vez de que tallando los prismas en cualquiera otra direccion se ven generalmente dos imágenes coloridas. Esta propiedad de producir imágenes simples al traves de las superficies del prisma, es, como sabemos, el carácter del eje de doble refraccion; y la direccion hallada de este modo en los cristales del sulfate de cal, se halla perfectamente comprobada por las direcciones de las secciones principales, indicadas sobre cualesquiera superficie por la polarizacion de la luz.

Pero por una singularidad que verosimilmente proviene de la estractura luminosa de esta sustancia, cuando la atraviesan en la direccion de su eje rayos polarizados sufren aun una accion de parte de este eje. Mas adelante esplicaremos las leyes de este fenómeno; aqui nos limitaremos únicamente á observar que la agata y la turmalina nos han presentado ya algo análogo á esto. Pero estas sustancias polarizaban fijamente la luz que las atravesaba en la direccion de sus venas, en vez de que las láminas de sulfate de cal no producen este efecto, pues su influencia no es sensible sino cuando obran sobre luz ya polarizada.

La situacion del eje de doble refraccion del sulfate de cal en el plano mismo de sus láminas, es una circunstancia muy favorable para la regularidad de las esperiencias que pueden hacerse con láminas delgadas de esta sustancia. Aunque cada lámina no tuviese sino un centésimo de milímetro de grueso, es un cristal tan perfecto como el cristal entero. Si á esta ventaja natural se une la precaucion de no emplear sino cristales perfectamente claros y regulares, se conseguirá con facilidad ir quitando unas despues de otras las láminas que los componen sin alterar en nada su regularidad. No

hay mas que indicar con un instrumento muy fino, por ejemplo, una lanceta, el principio de la separacion de las láminas, y se pueden quitar con la mano como se separaria un pedazo de tripa que se hallase pegado á un marmol pulimentado. Me es preciso entrar en todos estos permenores, porque las precauciones que acabo de indicar son indispensables para determinar con exactitud, y aun para percibir las leyes que siguen los fenómenos de los colores.

Habiendo, pues, separado una lámina semejante, coloquemosla en el anillo de nuestro aparato de dos vidrios. Para fijar las ideas supongamos que sea blanco el rayo á que se la presenta vertical, y polarizado en la direccion del meridiano. Entonces el plano de reflexion sobre el segundo vidrio deberá hallarse en el vertical de Este y Oeste. Interpuesta la lámina, y colocada, por ejemplo, bajo la incidencia perpendicular; la luz que le haya atravesado se conservará blanca, y continuará apareciendo tal, ya se la reciba en el ojo, ya se la haga caer perpendicularmente sobre un carton blanco, que refleje indistintamente todas sus partes, cualquiera que sea el sentido de su polarizacion. Pero si en vez de interceptarla se la deja llegar al segundo vidrio, que antes la transmitian enteramente, se reflejará en él cierta porcion que tendrá una tinta particular; tal es la esperiencia de Mr. Arago. Si se hace girar la lámina, permaneciendo siempre perpendicular la incidencia, esta tinta no variará de naturaleza, pero sí de intensidad, llegará á ser nula cuando el eje de doble refraccion de la lámina se dirija á alguno de los cuatro puntos cardinales; y estará en su maximum cuando se halle en los puntos intermedios, es decir, en el acimut de 45°, de 135°, de 225° ó de 315°. Todo esto supone que la lámina es de un grueso perfectamente igual por todas partes, y que se halla cristalizada regularmente.

Cualquiera que sea el número y grueso de las láminas estraidas de un mismo pedazo de sulfate de cal, si la cristalizacion es regular, los fenómenos de coloracion que produzcan sobre el segundo vidrio estarán limitados del mismo modo, y seguirán los mismos períodos de intensidad; en una palabra, no habrá mas diferencia entre estas láminas y el cristal total, que en la naturaleza de las tintas que produzcan, la cual variará segun su grueso, hasta degenerar en una blancura perfecta á cierto límite de grueso, que en los pedazos mas puros puede fijarse en $\frac{45}{100}$ de milímetro, como veremos mas adelante.

Puesto que cada lámina delgada y homogénea de sulfate de cal, no tiñe el segundo vidrio sino con una misma tinta siempre en cualquiera acimut que sea, se sigue que deja pasar libremente todos los rayos que componen la tinta complementaria á esta, ó á lo menos que no altera su polarizacion primitiva. Se puede considerar, pues la luz total como compuesta de estas dos tintas, una de las cuales pasando libremente, queda polarizada con relacion al plano del meridiano, y la otra, que es sobre quien obra la lámina sufre una nueva polarizacion cuya direccion deberemos determinar. Igualmente se llegaria á esta conclusion si en vez de analizar la luz transmitida por medio de un vidrio, se usase un prisma romboidal acromatizado, cuya seccion principal fuese paralela al plano de polarizacion primitivo. Entonces la interposicion de la lámina, haria producir al prisma una imágen estraordinaria, de una tinta exactamente idéntica á la que refleja el vidrio. Tambien se podria emplear como medio de analisis una lámina de color sin turmalina, ó una pila de vidrios. Las indicaciones que resultasen de aqui, se hallarian perfectamente conformes con las que hemos deducido de la reflexion.

Para determinar ahora el sentido de la nueva polarizacion, supongamos primeramente que sea único, es decir, que todas las partículas luminosas que

pierden la polarizacion primitiva, coloquen sus ejes en una misma direccion, que respecto á una posicion dada de la lámina, forme con el plano primivo de polarizacion un ángulo desconocido $2x$. Esta suposicion es la mas sencilla que puede hacerse, y pronto veremos que satisface completamente á todos los fenómenos. Para fijar las ideas llamemos O el conjunto de todas las moléculas que conservan su polarizacion primitiva, y E el de todas las que la pierden; sabemos que la mezcla completa de estas dos tintas O+E debe formar el blanco, puesto que el hacecillo transmitido no presenta ningun indicio de coloracion, cuando se le recibe en el ojo, ó en un carton blanco que no separe sus partes diversamente polarizadas. Luego si las direcciones de los ejes de las dos tintas O, E, forman entre sí un ángulo $2x$, no hay mas que colocar el plano de reflexion del segundo vidrio en el acimut x, exactamente intermedio, en cuyo caso verificándose la reflexion en la misma proporcion sobre ambas tintas O, E, el hacecillo total que refleje el vidrio deberá ser tambien blanco, como lo es la mezcla O+E de todas las partículas transmitidas. He aqui, pues, un carácter por el cual puede reconocerse la direccion x en cada posicion dada de la lámina al rededor del rayo polarizado. Tratando de comprobarla por la esperiencia, se halla que esta direccion coincide exactamente con el eje de la lámina cristalizada; es decir, que si este eje forma un ángulo i con el plano primitivo de polarizacion, la imágen refleja por el segundo vidrio es blanca, cuando el plano de reflexion sobre su superficie se dirige al acimut i, y por consiguiente, $2i$ es el acimut de la nueva polarizacion que adquiere la tinta E al atravesar la lámina cristalizada. El mismo fenómeno de reflexion de luz blanca se produce en el acimut 90^0+i, asi como en los de 180^0+i y 270^0+i; es decir, una vez en cada cuadrante: lo cual, como veremos despues, es una consecuencia de la division de

la polarizacion entre ambas tintas.

Igual resultado se obtiene sobre la direccion de la polarizacion nueva, si se analiza la luz transmitida con un prisma romboidal de espato de Islandia con una lámina de turmalina sin color, ó con una pila de vidrios. Suponiendo dirigido el eje de la lámina al acimut i, el prisma da dos imágenes blancas, cuando se dirige al mismo acimut su seccion principal. Cuando se dirige á él el eje de la lámina de turmalina ó el plano de reflexion de la pila de vidrios, se obtiene una sola imágen, pero igualmente blanca. Esta conformidad es una consecuencia necesaria de la identidad que hemos reconocido en las modificaciones comunicadas á la luz por estos diversos métodos.

Hemos sido, pues, conducidos por la esperiencia á reconocer esta propiedad fundamental de la polarizacion movible, cuando un rayo blanco polarizado en la direccion CX, fig. 7, cae perpendicularmente sobre una lámina de sulfate de cal, cuyo grueso no pase de $\frac{45}{100}$ de milímetro, y cuyo eje CA, forme un ángulo cualquiera i con la direccion CX de la polarizacion primitiva, el rayo transmitido está compuesto de dos hacecillos diversamente polarizados, uno en el acimut 0°, es decir, en la direccion CX de la polarizacion primitiva, y el otro en el acimut $2i$, es decir, en la direccion CX′, igualmente separada del eje CA.

Esto nos esplica ya por qué en nuestra primera esperiencia con el aparato de dos vidrios, la tinta E reflejada por el segundo llegaba á su maximum en el primer cuadrante, cuando el eje de la lámina formaba un ángulo de 45° con el plano primitivo de polarizacion; á saber, porque la tinta E polarizada siempre en el doble acimut, dirigia entonces sus ejes de polarizacion hácia CY, formando ángulos rectos con CX, y teniendo el segundo vidrio su plano de reflexion en la direccion CY, esto es, en el vertical de Este y Oeste,

se hallaba entonces colocada del modo mas favorable para reflejar E abundantemente, dejando pasar O. El mismo raciocinio esplica los otros tres maximos que se verifican en los cuadrantes siguientes á los 135°, 225°, y 315°, porque siendo los duplos de estos números multiplos pares de 45°, colocan siempre los ejes de polarizacion de la tinta E sobre CY ó CY′, formando ángulos rectos con CX. En fin, si en vez de analizar con un vidrio la luz transmitida, se analizase con un prisma romboidal, cuya seccion principal se dirigiese al acimut o, los mismos maximos se verificarian en todos los cuadrantes en la imágen estraordinaria que se observase por el prisma, y la demostracion es semejante. Ademas, en cada una de estas posiciones las tintas O, E, se hallarian completamente separadas por el romboide refractándose *toda* la primera ordinariamente, y extraordinariamente *toda* la segunda, en el acimut de 45°, de 135°, de 225° y de 315°, es, pues, donde hay que volver los ejes de las láminas para que la refraccion separe lo mejor posible las dos tintas O, E, cuando el prisma está colocado como acabamos de decir; y en efecto asi lo confirma la esperiencia.

Para prever cuál será el grado de separacion de estas tintas en los puntos intermedios, empecemos colocando el eje de las láminas en el acimut 0°, es decir en la misma direccion de la polarizacion primitiva, en cuyo caso las dos tintas O, E, se hallarán polarizadas del mismo modo, y nada podrá separarlas; por consiguiente darán siempre imágenes blancas. Pero si se hace girar el eje CA, formando un ángulo pequeño i. la separacion será posible, puesto que ya no serán coincidentes las dos direcciones de polarizacion CX, CX.′ Si se emplea como medio de analisis un prisma romboidal, cuya seccion principal se dirija al azimut 0°, refractará toda O ordinariamente, pero refractará tambien ordinariamente una gran parte de E, en

razon de la corta diferencia de las direcciones CX′, CX; y por consiguiente la imágen ordinaria será casi blanca, y muy débil la estraordinaria, como que solo se compone de las partes de E que abandona la otra. Pero la intensidad de esta imágen aumentará al paso que el ángulo *i* porque entonces se separarán mas y mas las direcciones CX, CX′, y por lo mismo la imágen ordinaria se teñirá cada vez mas de la tinta O. El maximum de separacion se verificará, como hemos dicho, cuando *i* sea igual á 45°, lo cual hace recto el ángulo XCX′. Pasado este término, y aumentando siempre *i* la amplitud de la separacion será mayor que un ángulo recto, CX′ se acercará á C*x*, y en fin, llegará á él cuando *i* llegue á 90°. Entonces las moléculas luminosas se hallarán diametralmente opuestas á lo que estaban, y como sus caras opuestos son igualmente modificables, la mezcla de las tintas en este estado será la misma que en CX.

Se pueden tambien espresar rigorosamente por medio del cálculo, las proporciones de las mezclas en cada posicion dada de la lámina y del cristal que sirve para analizar la luz. No hay mas que aplicar á cada una de las tintas O, E, los principios generales que arreglan la division de los rayos en un romboide. De este modo se obtienen fórmulas que espresan la composicion de las tintas de las dos imánes ordinaria y estraordinaria, respecto á todas las posiciones posibles del eje de la lámina y de la seccion principal del prisma romboidal que sirve para analizar los rayos transmitidos. Estas formulas concuerdan perfectamente con los fenómenos en todas sus consecuencias; y es fácil demostrar que el modo de polarizacion que indica es el único que puede tener esta propiedad.

Una de las consecuencias mas curiosas que se sacan de estas fórmulas, es, que si en vez de transmitir un solo rayo polarizado á traves de las láminas, se hiciesen pasar dos de iguales intensida-

des, y polarizados en direcciones rectangulares, los cuatro hacecillos de color que resultasen tendrian sus ejes de polarizacion en direcciones tales que el prisma romboidal al refractarlos reuniria las tintas complementarias, y solo produciria dos imágenes blancas de igual intensidad. Esta recomposicion se verifica, cualquiera que sea el ángulo que forme el eje de cristalizacion de la lámina con el plano primitivo de polarizacion de los rayos. Tambien se verificaria, si en vez de transmitir por medio de la lámina dos rayos, se transmitiesen un número cualquiera de pares, polarizados las direcciones posibles. Tal es exactamente el caso de los rayos emanados directamente de los cuerpos luminosos; porque estando distribuidos los ejes de las moléculas que contienen indiferentemente en todas direcciones al rededor del eje de translacion, se pueden concebir mentalmente como compuestos de una infinidad de pares de rayos infinitamente débiles polarizados á ángulos rectos en todos sentidos. Un conjunto semejante, transmitido al treves de nuestras láminas, no debe producir sino imágenes blancas de iguales intensidades, de cualquier modo que se analizen, y en efecto asi lo hace ver la esperiencia.

Pero estos resultados no determinan aun mas que el sentido de polarizacion de las dos tintas O y E, y su combinacion en las imágenes observadas por el prisma romboidal: ahora nos es necesario investigar cuál es en cada lámina la naturaleza de las tintas, y cómo varían segun el grueso. Haciendo este estudio se halla que son enteramente semejantes á las de los anillos coloridos, formados por una luz blanca entre dos objetivos sobrepuestos. La tinta E es siempre la de un anillo reflejo, y la O la del anillo transmitido correspondiente. Los gruesos á que se forman las diversas tintas E en las láminas de un mismo cristal bien puro, son exactamente proporcionales á los que estan marcados en la tabla de Newton, respecto á las láminas delgadas de una sus-

tancia no cristalizada, pero los valores absolutos de los gruesos, son mucho mayores que los que señala la tabla, siendo la misma la densidad. Yo he fijado estas relaciones por medio de un gran número de esperiencias, en las cuales he medido al mismo tiempo el grueso de las láminas con el esferómetro, y determinado comparativamente sus tintas por métodos muy exactos.

En las láminas de sulfate de cal sacadas de los cristales mas puros, el grueso que quitaba á la polarizacion primitiva, el azul claro del segundo órden era de $36\frac{1}{2}$ p. de mi esferómetro, que reduciendo á milésimas de milímetro, equivale á 82,44036. El grueso á que este azul se refleja en las láminas de vidrio por efecto de la reflexion ordinaria, se halla espresado por el número 9 en la tabla de Newton. Asi para reducir á esta misma escala cualquier otro grueso de sulfate de cal espresado en milésimas de milímetro, como el anterior, es preciso multiplicarle por la relacion de los dos valores correspondientes, es decir por $\frac{9}{82,44036}$ ó 0,10917 que poco mas ó menos equivale á $\frac{1}{9}$. Haciendo esta misma reduccion respecto á todos los gruesos de las láminas de sulfate de cal bien puras, se puede ver que la tinta que señala la tabla de Newton, es siempre exactamente la que quitan á la polarizacion primitiva bajo la incidencia perpendicular.

Un gran número de esperiencias dan á conocer que esta notable conformidad no es peculiar al sulfate de cal. Todos los cristales de doble refraccion, reducidos á láminas delgadas paralelas á su eje, presentan los mismos periodos de color y siguen las mismas leyes de polarizacion. Pero el valor absoluto de sus gruesos respecto á tintas semejantes varía, y ademas es recíprocamente proporcional á la variacion que la fuerza atractiva ó repulsiva de cada cristal, produce en el cuadrado de la velocidad de un rayo refracto situa-

do de un modo semejante. En el sulfate de cal y el cristal de roca, los gruesos que dan las mismas tintas E, son absolutamente iguales, y la variacion del cuadrado de la velocidad, es tambien la misma en las dos sustancias. Segun las observaciones de Malus, esta variacion es de 18 veces mayor en el espato de Islandia, y por consiguiente los gruesos que de las mismas tintas E deben ser 18 veces menores en las láminas de espato de Islandia, que en las de cristal de roca ó de sulfate de cal, siendo la misma la direccion del corte. Y puesto que en estos últimos cristales que tienen tan poca fuerza, el fenómeno de las tintas no se manifiesta en las láminas paralelas al eje, sino en gruesos muy pequeños, es claro que debe ser casi imposible hacerle conocer por el mismo método en un cristal 18 veces mas enérgico, y que ademas no se deja dividir naturalmente en hojuelas. Asi es que solo por otros métodos, atenuando ó combatiendo la fuerza repulsiva del espato de Islandia, podrá llegar á manifestarse en él.

Despues de haber fijado generalmente estos resultados, debemos volver á considerar algunas particularidades que ofrece la intensidad de las tintas E en los diferentes órdenes de anillos, porque estas particularidades singulares y aun en apariencia estravagantes, concuerdan perfectamente con nuestra teoría, y la confirman. Cuando se comparan entre sí por transmision un gran número de láminas de diferentes gruesos, analizando la luz transmitida por medio de un prisma romboidal acromático, se percibe al momento que en la posicion en que es mas completa la separacion de los dos rayos ordinario y estraordinario, la intensidad del rayo E varía de una lámina á otra tanto como su color. La razon de esta variacion, es evidente segun lo que acabamos de decir. Si el rayo E corresponde á la luz de los anillos reflejos, el rayo O que es su complementario, debe corresponder á la de los anillos transmitidos; y es muy diferente la relacion de in-

tensidad de los anillos transmitidos y reflejos en un mismo grueso, aun cuando no se compare sino la parte de luz que realmente se halla colorida. Esta desigualdad se manifiesta menos en los últimos órdenes de anillos, en que las dos tintas se inclinan igualmente al blanco compuesto al que llegan al infinito, pero en los colores de los primeros órdenes en que estos límites no son los mismos, las intensidades son muy diferentes. Por ejemplo, el blanco reflejo del primer órden, se halla opuesto al negro; y de aqui resulta que en una lámina delgada de sulfate de cal que observada por transmision presentase E de un blanco perfecto O, sería absolutamente nulo en la posicion en que es mayor la separacion de las dos tintas. Sola la casualidad, y una casualidad bien rara, haría caer exactamente en este límite; pero por las esperiencias espuestas antes, hemos visto que se puede acercar mucho á el; y en efecto, se han obtenido muchas veces láminas que no daban los rayos O sino estraordinariamente débiles, cuya tinta era azul ó roja, amarillenta, segun era un poco mayor ó menor su grueso que el que conviene al blanco perfecto, el cual por otra parte no puede tampoco comprender rigorosamente toda la luz transmitida, conforme á las leyes de los accesos. Si se quieren calcular los valores medios de los gruesos que limitan estos fenómenos, no hay mas que partir del grueso 82.44036 que hemos hallado arriba para el azul del segundo órden, y comparándole con el número 9 que la tabla de Newton señala á la misma tinta, se tendran porporcionalmente los límites siguientes en fracciones de milimetro.

Grueso en que no existe aun la polarizacion movible.	0,011777.	*principio del negro* en la tabla de Newton.
Blanco del primer órden	0,031144.	
Blanco compuesto de la mezcla de los colores de diferentes anillos. . .	0,45[illegible]93.	

Estos límites variarán de un cristal á otro segun el valor del factor constante que sirve para referirlos á la tabla de Newton, cuya determinacion hemos esplicado antes. Sin duda es un fenómeno muy digno de atencion, que una lámina de un grueso igual á 0,031144 de milímetro, pueda en cierta posicion determinada, polarizar completamente y en un solo sentido todas ó casi todas las moléculas de un rayo polarizado que la atraviesa, al mismo tiempo que otra lámina de igual naturaleza y mas gruesa no egerce su accion sino sobre una clase de estas moléculas. Nada manifiesta mejor que hay una relacion íntima entre la causa de la refraccion estraordinaria, y la que produce los anillos de colores; é igualmente se ve por esta semejanza, que no se puede decir de esta especie de accion, como tampoco de la reflexion ordinaria que se debilita á medida que las láminas son mas delgadas, puesto que por el contrario se hace mayor á ciertos gruesos mas pequeños.

La fragilidad de las láminas delgadas de sulfate de cal, no me ha permitido adelgazarlas lo bastante para poder observar el violado del primer órden, que es por donde empieza la polarizacion; tinta que debe ser siempre la mas dificil de descubrir por su debilidad, y por su posicion en el orígen de los anillos. Newton no hizo mas que suponerle cuando estudió los anillos de color formados entre dos objetivos, y no pudo verle claramente sino en las bolas de agua. Mas ya que Mr. Biot no ha podido llegar á este término bajo la incidencia perpendicular, á lo menos esta tinta es la única que bajo esta incidencia falta á sus observaciones; pues muchas veces ha llegado á obtener el azul del primer órden, que precede al blanco y que sigue al violado de que se acaba de hablar. Mr. Biot creyó poder obtener un grado mayor de tenuidad adelgazando las láminas de sulfate de cal por su disolucion lenta en una gran cantidad de agua, y en efecto, por esta accion que las hacia mas del-

gadas han subido sus colores en la serie de los anillos. De este modo ha obtenido azules muy intensos del primer órden, pero la fragilidad de las láminas era tal que apenas era posible tocarlas, pues se deshacían entre los dedos como polvo; su grueso entonces decia ser como de 0,01476 de milímetro. Estas pruebas que llegan casi hasta el último límite indicado por las leyes anteriores, nos demuestra su verdad y nos autorizan á inferir que si fuera posible adelgazar las láminas de sulfate de cal y de cristal de roca, paralelas al eje, de modo que tuviesen un grueso menor que 0,011777 de milímetro habrian perdido casi enteramente la accion polarizante, que resulta de su estructura como cristal. Mas adelante veremos que las láminas talladas en cualquiera otro sentido tienen límites análogos, pero mas estensos, á medida que su oblicuidad respecto al eje de cristalizacion hace mas débil la fuerza atractiva ó repulsiva; de suerte que eligiendo los cortes de un modo conveniente se puede llegar á límites de gruesos á que el arte no podría llegar. Este resultado, confirmando materialmente las analogías anteriores, me parece que indica con una gran verosimilitud que las moléculas integrantes de los cristales no poseen necesariamente la doble refraccion, aun cuando la produzca su conjunto. De donde se sigue que no debe mirarse esta simultaneidad, como un carácter á que debe sujetarse la forma primitiva de las partículas.

CAPITULO III.

Movimiento oscilatorio del eje de polarizacion, deducido de los fenómenos anteriores.

Reasumiendo los fenómenos de reflexion y transmision observados en las láminas delgadas, Newton ha deducido de ellos la propiedad de los accesos que los contiene todos. Del mismo modo reasumiendo

las leyes de la polarizacion movible, vamos á ver que todas se reducen á un movimiento oscilatorio del eje de polarizacion.

La primera de estas leyes corresponde á la direccion en que la polarizacion se verifica. Cuando un rayo polarizado ha atravesado perpendicularmente una lámina delgada de sulfate de cal, de cuarzo, ó de cualquier otro cristal, tallado paralelamente al eje de doble refraccion, se halla compuesto de dos hacecillos de color O E, polarizados de distinto modo. Si CX, fig. 8, es la direccion de la polarizacion primitiva, y CA el eje de la lámina delgada que forma con aquella un ángulo i, el hacecillo que hemos designado por O, se halla polarizado en la direccion CX, y el hacecillo complementario E, se halla polarizado enteramente al otro lado del eje CA á una distancia angular exactamente igual, representada en la figura por $X' x'$.

La segunda ley que hemos establecido es relativa á la naturaleza de las tintas O E. Hemos visto que son las mismas que las de los anillos de colores observados por Newton, correspondiendo siempre O á un anillo transmitido, y E al anillo reflejo correspondiente. Asi esta última tinta sigue, segun los diferentes gruesos, las proporciones señaladas por la tabla de Newton á los colores de las láminas delgadas. Bajo este aspecto, los cristales de diferente naturaleza no ofrecen mas diferencia que en el coeficiente absoluto de su proporcionalidad, que es siempre mucho mayor que en los anillos considerados por Newton.

Esta perfecta conformidad de colores en ambos fenómenos, cuando la luz incidente es blanca y la proporcionalidad de los gruesos que les corresponden exige necesariamente que la misma correspondencia exista en particular respecto á cada especie de color simple. Ahora bien, al analizar Newton los fenómenos de los anillos compuestos, ha probado que cada especie de luz simple de una refrangibili-

dad fija que concurre á producirlos se transmite y refleja alternativamente en los intervalos de grueso comprendidos entre los términos de la serie siguiente $o, e, 2e, 3e, 4e, 5e$ . . . . . . luego cuando esta misma luz simple atraviese láminas delgadas de un mismo cristal, cortadas paralelamente á su eje, las alternativas de polarizacion que conserve despues de su salida, deben seguir periodos exactamente semejantes. Asi desde el grueso o hasta cierto grueso fundamental e' las moléculas homogéneas que la componen, obran despues de su emergencia como si no hubiesen perdido su polarizacion primitiva. Desde e' hasta $2e'$ obran como si la hubiesen dejado para tomar una nueva en el azimut $2i'$, y en fin, aparecen alternativamente polarizadas en el azimut o^{o} ó en el azimut $2i$, segun corresponden á una transmision ó á una reflexion los gruesos por donde han pasado; de suerte que el eje de polarizacion del hacecillo parece transportado alternativamente, y como por oscilacion de uno á otro de estos límites. Este movimiento puede verificarse de dos modos ó yendo en la direccion XX′ de o á $2i$, ó en el sentido Xx' de o á $-2(90-i)$. En el primer caso de oscilacion se verificará al rededor del eje CA de la lámina, y en el segundo al rededor de la línea perpendicular BB. Es verosimil que las moléculas luminosas se repartan entre estas dos direcciones, puesto que definitivamente se hallan repartidas en una y otra cuando llegan á la polarizacion fija.

Pero este cambio periódico no es aun aqui mas que un efecto total y absoluto que resulta de todas las acciones que las moléculas luminosas han sufrido al atravesar las láminas cristalizadas. Ahora es necesario saber á medida que se introducen en una sola y misma lámina, sufren realmente estas alternativas, y si los diferentes rayos de que se compone la luz blanca sufren sucesivamente en su interior las mismas separaciones de tintas que observamos en ellos, cuando salen juntos de diferentes láminas y

de gruesos semejantes. Tal es el objeto de la esperiencia siguiente.

Tómese una lámina delgada de sulfate de cal, y habiendo observado con atencion por medio de nuestro aparato los colores O E que da bajo la incidencia perpendicular, rájese con habilidad en una parte de su longitud, de modo que se divida esta sola parte en muchas láminas delgadas que se mantendrán separadas unas de otras, introduciendo entre ellas tintas de papel negro. Si se presenta de nuevo la lámina á un rayo polarizado, volviéndola á colocar bajo la incidencia perpendicular, se hallará que vuelve á dar siempre las mismas tintas O, E que en la primera esperiencia, y bajo este punto de vista no habrá diferencia alguna entre la parte rajada y la entera, sino que la primera aparecerá menos transparente, á causa de la multiplicidad de reflexiones que la luz sufre en ella. Y puesto que la tinta definitiva de los hacecillos es independiente de la contigüidad ó separacion de las láminas elementales, es necesario inferir que al llegar el rayo á los gruesos sucesivos de la sustancia cristalizada, sufre en ella en ambos casos modificaciones equivalentes que se suceden por los mismos grados, y que hacen pasar cada especie de moléculas luminosas por los mismos estados alternativos de polarizacion que señala el orden de tintas en las láminas separadas. Síguese de aqui, que el estado definitivo de cada molécula á una profundidad determinada, debe depender únicamente de la cantidad de materia cristalizada que ha atravesado para llegar á esta profundidad, y de la intensidad de las fuerzas de que se halla dorada esta materia, pero no del modo con que se halla distribuida en el camino de la molécula. Asi cuando se ha dividido una lámina en toda su longitud en cierto número de láminas mas delgadas, se pueden mezclar estas en un órden cualquiera y alternarlas de todos los modos imaginables, con tal que se mantengan siempre sus ejes exactamente pa-

ralelos, sin que cambien las tintas definitivas O, E, producidas por su suma, pues permanecia siempre las mismas que daba la lámina antes de dividirse (1), y es claro que con estas diferentes colocaciones de las lánimas no se ha hecho otra cosa que variar arbitrariamente el modo de division de un mismo grueso.

Segun esto, todos los fenómenos que presentan nuestras láminas pueden reunirse en la proposicion siguiente, que es su espresion mas general.

1.º Cuando un rayo de luz simple polarizado en una direccion fija, atraviese perpendicularmente una lámina cristalizada paralela al eje de doble refraccion, las moléculas luminosas empiezan penetrando hasta cierta profundidad, sin perder su polarizacion primitiva; en seguida, y continuando siempre su movimiento de translacion, empiezan á oscilar al rededor de su eje de translacion, de modo que su eje de polarizacion se traslada alternativamente á un lado y otro del eje del cristal ó de la línea perpendicular á él, en iguales distancias, como un péndulo á uno y otro lado de la vertical de que se le ha separado. Cada una de estas oscilaciones se verifica en un grueso $2e'$ doble del que la molécula habia corrido primeramente antes de entrar en oscilacion.

2.º En un mismo cristal, los valores de e' son diferentes respecto á las diversas especies de moléculas luminosas, y proporcionales á las longitudes de sus accesos de fácil transmision ó de fácil reflexion. Pero los límites de las oscilaciones son los mismos respecto á todas las partículas que siguen una misma direccion en su movimiento, cuando sus ejes de polarizacion parten de una direccion primitiva comun.

3.º Este movimiento oscilatorio cesa cuando llegando las moléculas luminosas á la segunda super-

(1) Limitamos aqui la prueba á la incidencia perpendicular para evitar el efecto de la polarizacion por refraccion.

ficie de la lámina, salen al aire, ó á otro medio que no posea la doble refraccion. Si entonces se espone el rayo emergente á la accion de un prisma de espato de Islandia, de un vidrio inclinado, ó de cualquier otro sistema que produzca la polarizacion fija, las moléculas luminosas proceden como si poseyesen completamente el sentido de polarizacion hácia el cual les conducia su última oscilacion, ya la hayan acabado enteramente, ya la hayan empezado tan solo en el momento en que han salido del cristal.

Tales son las leyes teóricas de la polarizacion movible, las cuales se aplican igualmente á todos los demas cortes de los cristales considerando las oscilaciones, como si se verificasen al rededor de los planos tirados por el eje del cristal y la direccion definitiva de cada rayo refracto. Pero desde luego es claro, que este movimiento oscilatorio debe cesar á cierta profundidad en cada cristal, segun su naturaleza y el sentido en que esté tallado; porque aumentando bastante el grueso de las láminas oblicuas al eje, para que el rayo emergente se separe en dos hacecillos, despues de haberlas atravesado, se halla, como hemos visto en la primera parte de estas investigaciones, que el hacecillo que ha sufrido la refraccion ordinaria está polarizado fijamente en el plano tirado por su direccion y el eje del cristal; y el rayo estraordinario lo está tambien fijamente, pero perpendicularmente á dicho plano. Es muy verosimil que las moléculas que forman cada hacecillo pasen progresivamente del movimiento oscilatorio á este estado fijo; á lo menos, veremos en otros ejemplos análogos, que se verifica una cosa semejante cuando se esponen simultáneamente las moléculas luminosas á muchas fuerzas que obran sobre ellas en diferentes direcciones. Por ahora nos limitaremos á anunciar que en todos los cristales, cualquiera que sea la direccion en que se hallen, el movimiento oscilatorio se estiende á profundida-

des mucho mayores que aquellas en que se cesa de percibir inmediatamente colores por la sucesion de las oscilaciones.

No siendo mas las tres proposiciones enunciadas antes, que la espresion sencilla, pero completa de los fenómenos, es evidente que su desarrollo debe reproducirlos: sin embargo, como esta deduccion facilita su uso y hace conocer su exactitud, creo que será útil esplicarle aqui.

Consideremos, pues, un rayo polarizado, simple ó compuesto, que penetre perpendicularmente una lámina delgada de un cristal cualquiera, cortada paralelamente al eje de doble refraccion; y supongamos la lámina colocada de modo, que este eje forme un ángulo cualquiera i con el plano de polarizacion primitivo, é investiguemos cual deberá ser el estado del rayo despues de su emergencia.

Al principio, en virtud del movimiento oscilatorio, los ejes de todas las moléculas luminosas estarán repartidos en los dos límites de la oscilacion, es decir en o y $2i$, ya efectivamente respecto á las que hayan acabado un número entero de oscilaciones al salir de la lámina, ya virtualmente respecto las que no hayan concluido su última oscilacion. Llamemos O, E, el conjunto de las moléculas que forman cada uno de estos dos grupos, comprendiendo el primero todas las que acaban un número par de oscilaciones al salir de la lámina, y el segundo las que acaban un número impar. Si se analiza el rayo emergente con un prisma de espato de Islandia, cuya seccion principal esté dirigida á un azimut cualquiera, basta para calcular las tintas que resultan, aplicar á cada hacecillo las leyes generales de la doble refraccion. Asi se hallan exactamente las mismas fórmulas dadas por la esperiencia para la combinacion de las tintas O, E, y no falta mas que determinar su naturaleza. Para esto no hay mas que aplicar al rayo incidente la construccion propuesta

por Newton para determinar las tintas transmitidas ó reflejas segun los diferentes gruesos de las láminas delgadas, substituyendo á las longitudes de los accesos, empleadas en aquella construccion, los gruesos mucho mayores, pero proporcionales, que las moléculas luminosas atraviesan en nuestras láminas, durante el tiempo de una oscilacion. Asi como el fenómeno de la reflexion, las moléculas penetran juntas hasta una pequeña profundidad sin sufrir ninguna fuerza que las disponga á reflejarse, y si el grueso del cuerpo es menor que esta profundidad, se transmiten libremente; del mismo modo en los fenómenos de la polarizacion, todas las moléculas penetran juntas hasta una pequeña profundidad sin sufrir ninguna alteracion en sus ejes de polarizacion, y si el grueso de las láminas es menor que este límite, conservan todas su polarizacion primitiva. En la reflexion este primer intervalo es igual á la mitad de la longitud de un acceso; en la polarizacion será la mitad del espacio que cada género de luz simple atraviesa durante una oscilacion entera. En la reflexion, pasado este límite empiezan á reflejarse las moléculas violadas, en seguida las violadas y azules, despues las violadas, las azules y las verdes, y asi sucesivamente hasta las rojas que se reflejan las últimas, pero siempre á poca distancia de las demas. Con esto el rayo reflejo aparece sucesivamente violado, azul, y casi en seguida blanco, por el concurso de todos los colores. Del mismo modo en nuestras láminas, el primer rayo E que quitan á la polarizacion primitiva es violado; á un grueso un poco mayor se mezcla este violado con un azul oscuro, y forma un azul claro; el azul se cambia casi inmediatamente en blanco por la mezcla de todos los colores, que es el blanco que Newton ha llamado del primer órden; y del mismo modo que en los anillos se llega á un grueso en que este blanco es el mas abundante posible, de suerte que no se transmite nada, ó casi nada de la

parte de luz incidente que se emplea en formaa los anillos; asi en nuestras láminas hay cierto grueso en que el rayo blanco que polarizan contiene toda ó casi toda la luz incidente; de suerte que no hay ninguna ó casi ninguna parte de esta luz que conserve su polarizacion primitiva. En la reflexion, cuando el grueso llega á ser un poco mayor, los diferentes colores que componian el blanco del primer órden, se separan de él progresivamente, siguiendo el mismo órden con que se reunieron, es decir, primero los rayos violados, que son lo mas refrangibles, porque sus accesos son los mas cortos; despues los violados y azules; luego los azules, los verdes, y en fin los rojos; lo cual hace cambiar sucesivamente este blanco en amarillo pálido, naranjado, naranjado rojizo, y un rojo que acabaría en una privacion total de luz, es decir, en el negro, si casi en el mismo grueso no empezase el segundo acceso de los rayos violados, lo cual hace que siga inmediatamente á este rojo oscuro, un purpura muy débil, al cual sucede de nuevo el violado, azul, verde, y demas colores del segundo anillo, los cuales dominan alternativamente en la mezcla y se hallan mas separados que en el primer anillo, porque han tenido mas tiempo de manifestar la diferencia de sus accesos. Del mismo modo, y absolutamente lo mismo, en nuestras láminas siendo desiguales los gruesos que corresponden á las oscilaciones de las diferentes moléculas, y proporcionales á las longitudes de sus accesos, se ve que deben reproducirse modificaciones semejantes de tintas, y en efecto se reproducen con la mayor exactitud; es decir, que despues del grueso en que las moléculas luminosas se hallan todas juntas en su primera oscilacion, sucede que las moléculas violadas como mas refrangibles se separan de las otras, se adelantan, y empiezan una segunda oscilacion que las dirige hácia la polarizacion primitiva, cuando las moléculas azules, verdes, naranjadas y rojas, no han concluido aun

su primera oscilacion. Si se corta la lámina á este grueso, se halla que el hacecillo que ha perdido su polarizacion primitiva es un blanco, ligeramente amarillento; á un grueso un poco mayor este amarillo se cambia en naranjado, y entonces ha perdido las moléculas violadas, azules y verdes, que se hallan ya en la segunda oscilacion, inmediatamente despues, no conserva ya sino un pequeño número de rayos de un rojo oscuro, pues todas las demas moléculas han entrado ya en su segunda oscilacion, y por consiguiente la parte de luz que al atravesar el romboide se dirige hácia la polarizacion primitiva, forma la especie de tinta que resulta de la mezcla de todos los colores, privada de un pequeño número de rayos rojos, es decir, un blanco azulado; y pasado este término cierto número de moléculas violadas empiezan ya su tercera oscilacion cuando las moléculas rojas menos refrangibles aun no han concluido la primera. La tinta que polariza la lámina con este grueso, es un violado; ó mas bien un púrpura estremamente débil y oscuro que pasa inmediatamente al azul, al verde y á todos los colores del segundo anillo. Siguiendo siempre con el pensamiento esta serie de movimientos oscilatorios cuyas velocidades son desiguales respecto á las moléculas luminosas de diferentes especies, se concibe que los diferentes colores deben mezclarse mas y mas en sus límites hácia los dos estremos de la oscilacion, y producir al fin en ellos dos imágenes blancas, como sucede en los anillos reflejos y transmitidos, en virtud de la diferente longitud de los accesos, cuando el grueso del cuerpo llega á ser bastante considerable, para que todos los colores concurran á un mismo tiempo, por medio de diferentes anillos, á la transmision y á la reflexion. Esta perfecta identidad en la sucesion de las tintas, en sus mezclas progresivas, en los periodos de sus intensidades, y en fin, hasta en las mas pequeñas circunstancias de sus variaciones, bastaria para ma-

nifestar la conformidad que existe entre las leyes de periodicidad que unen estas dos clases de fenómenos, aun cuando las medidas de los gruesos tomadas en ambas con un cuidado estremo, y comparadas con la mayor escrupulosidad, no hubieran ya demostrado de un modo rigoroso y directo la existencia de estas relaciones.

Sin embargo, debemos observar una diferencia esencial. La construccion que Newton ha imaginado para representar las alternativas de reflexion y de transmision, asi como la tabla que ha deducido de ella, supone fuerzas reflejantes muy débiles, y se aplica solo á la pequeña porcion de luz incidente que se emplea entonces en la formacion de los anillos. Hemos hecho ver antes, página 76 que si esta porcion hubiese de ser mas considerable, por efectos de fuerzas reflejantes mas enérgicas, los intervalos de grueso propios para transmitir ó reflejar, no serian iguales, como supone esta construccion; los últimos se estenderian mas, y aun llegarian á ocupar todo el espacio si la reflexion se hiciese total en medio de cada anillo. No sucede asi en los fenómenos de la polarizacion movible que producen nuestras láminas; porque todas las moléculas que las penetran sufren el movimiento oscilatorio, y su distribucion entre las idas y venidas se halla exactamente espresada por la construccion de Newton, sin ninguna alteracion. Esto parece que constituye una distincion fundamental entre las dos clases de fenómenos, y en efecto, una ley de periodicidad semejante, y la proporcionalidad del grueso respecto á los colores simples, bastan para producir todas las relaciones que hemos observado.

Hemos establecido antes que la amplitud de las oscilaciones del mismo sentido es la misma respecto á todas las moléculas luminosas, é igual á $2i$ ó á $-2(90-i)$, es decir, al duplo del angulo que el eje de la lamina ó la linea perpendicular á el, forman con la direccion primitiva de polarizacion.

Esto es un efecto conforme á la esperiencia; pues si se presenta una de nuestras láminas perpendicularmente á un rayo polarizado, haciendo pasar sucesivamente su eje de uno á otro azimut, desde 0° hasta 360°, se halla que son constantes rigorosamente, tanto la tinta E que pierde su polarizacion primitiva, como la tinta O que la conserva; constancia que no pudiera verificarse si los diferentes rayos simples de que se compone, estuviesen polarizados en diferentes sentidos. Los tiempos de las oscilaciones de las moléculas luminosas, son, pues, tambien iguales en todos estos casos, puesto que sola su duracion determina la naturaleza de las tintas que deben polarizarse en un sentido ó en ótro. Asi, la fuerza que produce las oscilaciones es tal, que su duracion es absolutamente independiente de su amplitud; y esta condicion exige, que la accion de cada fuerza, sea en cada momento proporcional al arco que las moléculas deben describir para llegar al medio de su oscilacion, es decir, á la direccion del eje de donde emanan las fuerzas, ó á la línea perpendicular.

CAPITULO IV.

Exámen de las modificaciones que sufren las moléculas luminosas, cuando atraviesan sucesivamente muchas láminas que producen la polarizacion movible. Métodos que resultan de este exámen, para desenvolver las imágenes de color en las láminas gruesas por el cruzamiento de sus ejes.

Hemos ya determinado por medio de las proposiciones establecidas antes, lo que sucede á las moléculas luminosas cuando pasan de la polarizacion movible á la polarizacion fija y reciprocamente. Ahora vamos á estudiarlas cuando despues de haber sufrido en una lámina la polarizacion movible, la sufren aun en otra segunda lámina de igual ó de distinta naturaleza. De este modo se halla que las os-

cilaciones vuelven á empezar en esta lámina, con las mismas duraciones, los mismos límites y las mismas amplitudes que tendrian si cada hacecillo, al salir de la primera lámina estuviese polarizado fijamente; pero las profundidades á que empiezan estas oscilaciones varían segun la naturaleza de la segunda lámina y la direccion de su eje con respecto á los de polarizacion de los hacecillos.

Síguese de aqui que el modo de polarizacion definitivo del hacecillo emergente se puede aun determinar por los solos principios del movimiento oscilatorio. Pero la naturaleza de las tintas depende de la profundidad á que vuelven á empezar las oscilaciones, y á renovarse al pasar de una á otra lámina; y solo la esperiencia puede servirnos en este punto. Espondré dos leyes esperimentales que se verifican en estos fenómenos, y cuyas aplicaciones son á propósito para aclarar y generalizar todo cuanto hemos dicho hasta ahora.

La primera ley es relativa á las láminas cristalizadas, cuyas acciones son de igual naturaleza, esto es, ambas atractivas ó ambas repulsivas. Cuando un rayo polarizado atraviesa sucesiva y perpendicularmente dos láminas semejantes, cuyos ejes esten paralelos, la tinta E″ que el sistema de las dos láminas sustrae á la polarizacion primitiva tiene por valor numérico en la tabla de Newton la suma E+E′ de los números correspondientes á las tintas particulares EE′, sobre las cuales hubiera producido igual efecto cada lámina de por sí. Mas si los ejes de las láminas se hallan cruzados en ángulos rectos, el valor numérico de E″ será igual á la diferencia E—E′ de los números que representan las tintas parciales.

Supongamos que reducida una de las dos láminas á la escala de Newton tenga por grueso 14,25; de suerte, que obrando sola sobre el rayo polarizado, la tinta E que sustraiga á la polarizacion primitiva sea el azul obscuro del tercer órden; combinémosla con otra lámina, cuyo grueso reducido

del mismo modo sea 9,35; de modo que obrando solo sustrajese á la polarizacion primitiva otra tinta E′ intermedia entre el azul y el verde del segundo órden. Si se ponen los ejes de las láminas paralelos, la tinta E″, que su conjunto quitará á la polarizacion primitiva, tendrá por valor numérico 14,25+9,35 ó 23,6 que corresponde al rojo del cuarto órden; pero si se cruzan los ejes de las dos láminas en ángulos rectos, la tinta E″ tendrá por valor 14,25—9,35, ó 4,9 que corresponde un poco mas arriba del naranjado del primer órden entre este naranjado y el amarillo pálido. En este último caso, si las dos láminas tuviesen exactamente un mismo grueso, el rayo transmitido habria vuelto á recobrar enteramente su polarizacion primitiva, porque los efctos de una destruirian los de la otra. Esta perfecta igualdad de gruesos se obtiene separando de un cristal bien puro de sulfate de cal una lámina muy delgada, y partiéndola en dos por sus uniones naturales, las cuales pueden sobreponerse con los ejes cruzados.

La segunda ley se refiere á láminas, cuyas acciones polarizantes son de distinta naturaleza, una atractiva y otra repulsiva; en cuyo caso son inversos los fenómenos que resultan de su combinacion. Si sus ejes son paralelos, la tinta E′, dimanada de la polarizacion primitiva, es igual á la diferencia de las tintas parciales E—E′; y si sus ejes se cruzan en ángulos rectos, el valor de E′ es igual á la suma de los valores parciales, ó E+E′.

Estas leyes, que se pueden comprobar fácilmente por la esperiencia, se verifican aun cuando no se toquen las láminas, sino que igualmente subsisten á cualquiera distancia que esten una de otra, y en todos los órdenes de anillo.

Este último resultado presenta una consecuencia muy digna de atencion, y que podrá servir de prueba á todo lo que precede. En efecto, si la ley subsiste en todos los órdenes de anillos, debe esten-

derse á todos los gruesos á que llega la polarizacion movible, aunque en ellos no puedan percibirse colores, pues estos gruesos no se diferencian de los demas sino en que corresponden á anillos mas compuestos. Asi, cruzando estas láminas en ángulos rectos, si son de igual naturaleza, ó colocando paralelos sus ejes, si son ambas de naturaleza diferente, deben producir hacecillos de colores cuando la diferencia de sus gruesos es menor que el grueso que produce imágenes blancas. En efecto, asi se verifica; y esta esperiencia, á que se ha llegado directamente por los resultados anteriores, ha servido para establecer completamente las leyes espuestas en el capítulo anterior, que se han comprobado en toda especie de cristales.

Asi se ha visto que la polarizacion movible se estiende á profundidades mucho mayores que lo que puede hacer creer la simple observacion de láminas delgadas, pues se han desénvuelto por medio del cruzamiento de los ejes los colores de los hacecillos en pedazos de cristal de roca paralelos al eje, que tenian mas de cuatro centímetros de grueso, y que daban solo imágenes perfectamente blancas é iguales en intensidad; pero que combinadas en ángulos rectos hacian aparecer en el rayo estraordinario todas las tintas que se querian. Estas tintas, comparadas en su sucesion y sus variaciones con los anillos formados en las láminas delgadas, han confirmado siempre el resultado deducido de nuestras primeras esperiencias, á saber, que la parte del rayo incidente que pierde su polarizacion primitiva, sigue el órden de los anillos reflejos, al paso que la parte del mismo rayo que la conserva sigue los periodos de intensidad y de tinta de los anillos transmitidos; mas aqui vemos establecido este mismo resultado con respecto á láminas de bastante grueso, en vez de que mis primeras esperiencias no demostraban su existencia sino respecto á láminas de un grueso limitado y necesariamente muy pe-

queño. Indicaré aqui una analogía que nos servirá á un mismo tiempo de autoridad y de ejemplo, y es, que Newton en su óptica ha empezado fundando la teoría de los accesos en las transmisiones de la luz al través de láminas delgadas, y en seguida la ha confirmado aplicándole á láminas de un cuarto de pulgada de grueso y aun mas, en las cuales halló el medio de hacer sensibles las diferencias de los anillos y del tamaño indicado por el cálculo, aunque las moléculas luminosas sufrian sus accesos al atravesar estas láminas muchos centenares y aun millares de veces.

La operacion del cruzamiento de los ejes es la mas directa y sencilla que puede emplearse para reconocer si un cristal es atractivo ó repulsivo. No hay mas que formar de él una lámina de caras paralelas, esponerla perpendicularmente á un rayo polarizado, cruzándola con una lámina de sulfate de cal, de cristal de roca ó de cualquiera otra sustancia cuya accion sea conocida, y analizar el hacecillo transmitido por medio de un prisma de espato de Islandia acromático. Si se obtienen colores cruzando los ejes en ángulos rectos, los dos cristales sobrepuestos ejercen acciones de igual naturaleza; y y si se obtiene colocando sus ejes paralelos, las acciones son de naturaleza opuesta. Esta prueba no exige, como veremos muy pronto, que las dos láminas esten cortadas paralelamente al eje de su cristal, ni aun que ambas lo esten en una direccion semejante. Basta que en cada una de ellas se conozca la direccion de la seccion principal para conocer en qué sentido está colocado el eje.

Para obtener esta indicacion de un modo, Mr. Biot cortó muchas láminas de cristal de roca de diferentes gruesos, paralelamente al eje, y las ha usado para hacer producir colores en los demas cristales que queria esperimentar. Halló que no tenian el grueso conveniente, las cruzó con otra lámina de sulfate de cal, cuyo eje determinó de es-

te modo; y despues de haber marcado con tinta su direccion sobre la lámina estrajo de ella todas las laminitas mas delgadas que necesitó.

CAPITULO V.

De las variaciones que sufren las fuerzas polarizantes por la inclinacion de los rayos refractos con el eje de los cristales.

Las leyes que acabamos de establecer comprenden todos los fenómenos de coloracion que pueden producir bajo la incidencia perpendicular las láminas cristalizadas paralelas al eje. Pero cuando estas láminas se inclinan á los rayos que las atraviesan, las tintas que resultan en el prisma romboidal sufren generalmente variaciones producidas por el cambio de intensidad de la fuerza repulsiva ó atractiva emanada del eje, y por el aumento de camino, durante el cual se halla espuesto á su accion el rayo transmitido.

Dos ejemplos bastarán para hacer esto sensible. Supongamos primero, fig. 9, que habiendo espuesto una de nuestras láminas perpendicularmente á un rayo polarizado, como en las esperiencias anteriores, hacemos girar su eje CA, de modo que forme un ángulo de 45° con la direccion CX de la polarizacion primitiva; esto hará descomponer el rayo en dos hacecillos de color O E, polarizados en ángulos rectos; uno en la direccion CX y otro en la direccion CI. Analicemos la luz transmitida por medio de un prisma romboidal acromatizado, cuya seccion principal esté colocada en la direccion CX. Entonces todo el hacecillo O sufrirá la refraccion ordinaria en este prisma, y todo el hacecillo E la estraordinaria, como hemos visto ya repetidas veces. Esto supuesto, si se inclina la lámina en la direccion CA, sin tocar al prisma; de modo que el eje CA se acerque el rayo polarizado sin salir del plano

ciones es proporcional á la cuarta potencia del seno de este ángulo, y que en general el valor numérico de la tinta E que una lámina dada sustrae á la polarizacion primitiva es casi exactamente proporcional al camino que corre la luz por dentro de su sustancia, multiplicado por el cuadrado del mismo seno.

Estos cambios de accion se verifican igualmente en las láminas gruesas, cuando se presentan al rayo polarizado bajo diferentes incidencias y siguen exactamente las mismas leyes; pero para reconocerlos es preciso modificar la luz polarizada que llega á estas láminas, de modo que á pesar de su grueso den hacecillos coloridos al atravesar el prisma romboidal. Esto se consigue haciendo atravesar la luz primeramente por otra lámina, cuya accion total se diferencie poco de la que se quiere estudiar, y que esté colocada de modo que las secciones principales de las dos láminas se hallen paralelas si sus acciones son de naturaleza contraria, ó cruzadas en ángulos rectos si son de la misma naturaleza. Esto no es mas que una estension de las esperiencias esplicadas en el capítulo anterior.

El ejemplo siguiente manifestará la aplicacion de este método. Tenia Mr. Biot dos láminas de sulfate de cal, cuyos gruesos, medidos con el esferómetro y reducidos á la escala de Newton, eran uno de 249 partes y otro de 266. Para abreviar llamaremos A á la primera y B á la segunda. Su diferencia B—A era, pues, igual á 17 partes, que en la tercera columna de la tabla de Newton corresponde á una tinta intermedia entre el verde vivo del tercer órden y el amarillo blanquizco que le sigue. En efecto, esta era la tinta E que el sistema de las dos láminas quitaba á la polarizacion primitiva cuando estaban espuestas á un rayo polarizado bajo la incidencia perpendicular y con los ejes cruzados en ángulos rectos. Hemos visto ya que para observar este fenómeno del modo mas perceptible es necesario dirigir los

de incidencia, la túnica E observada por el prisma *subirá* en el órden de los anillos, como si la lámina se hiciese mas delgada; y por el contrario, si se inclina la lámina en el sentido CB, perpendicular á CA, de modo que CA quede perpendicular al plano de incidencia, la tinta E *bajará* en el órden de los anillos, como si se hiciese mas gruesa la lámina.

Examinemos primero el segundo caso, que es el mas sencillo. Puesto que el eje CA permanece siempre perpendicular al plano en que se inclina la lámina, el rayo refracto en ella forma siempre un ángulo recto con este eje. Asi la fuerza que emane de él, ya sea atractiva, ya repulsiva, obra sobre el rayo con la misma energia que bajo la incidencia perpendicular; pero obra durante mas tiempo, porque el camino que tiene que andar el rayo se alarga por la oblicuidad; por consiguiente las moléculas luminosas forman en la lámina oscilaciones tan rápidas y mas numerosas, y las tintas E deben bajar en el órden de los anillos.

En el otro caso, en que se inclina la lámina en la direccion de su eje, se producen dos efectos. El camino se alarga como en el primer caso; pero se disminuye la fuerza del eje, porque forma un ángulo menor con el rayo incidente, y por consiguiente con el refracto. Estas dos causas se combaten, pues, una para aumentar y otra para disminuir la accion de la lámina. Pero la esperiencia prueba que es superior la última; de suerte que el número total de oscilaciones es menor que bajo la incidencia perpendicular. Las tintas E deben, pues, subir en el órden de los anillos; y la ley de estas variaciones, comparada con la de las que se producen en virtud del grueso bajo la incidencia perpendicular, determina la duracion de las oscilaciones respecto á los diversos ángulos que el eje del cristal forma con el rayo refracto. Resulta de esta comparacion que la fuerza que produce las oscila-

ejes de las láminas á 45° del plano de la polarizacion primitiva, y hacer girar en este plano la seccion principal del prisma romboidal acromatizado que sirve para analizár la luz transmitida.

Dispuestas las cosas de este modo, dejó la lámina mas delgada A bajo la incidencia perpendicular, é inclinó al rayo incidente la mas gruesa B en el sentido de su eje, es decir, de modo que este permanezca en el plano de incidencia. Entonces se debilita la accion total de B, continuando la misma la de A; y por consiguiente debe disminuir la diferencia B — A′, y la tinta E que el sistema sustrae á la polarizacion primitiva debe *subir* en el órden de los anillos, como si resultase de una lámina mas delgada. Si por medio de este movimiento se llega á una incidencia en que el valor de B, debilitado de este modo, iguale solo al de A, las dos acciones deben compensarse; y el rayo, despues de haberlas atravesado ambas, se hallará exactamente en su polarizacion primitiva, como si el sistema no hubiese ejercido sobre él ninguna accion. Pasado este término, si se continúa debilitando á B, haciendo inclinar mas su eje, la accion total de la lámina A será la mas fuerte, y las tintas empezarán á bajar en el órden de los anillos, asi como habia subido anteriormente. Para juzgar con cuánta exactitud confirma la esperiencia estas consideraciones no hay mas que fijar la vista en la tabla siguiente, construida con arreglo á observaciones reales.

Incidencia observada. θ	Angulo de refraccion. θ′	Tinta observada del rayo ordinario O.	Tinta observada del rayo estraordinario E.	valor de E segun la tinta observada.	Orden de las tintas.
0° 0′ 0′′	0° 0′ 0′	Violado.	Verde amarillento.	17,00	Orden 3.°
12 30 40	8 18 10	Rojo.	Verde vivo.	16,25	
17 35 40	11 37 30	Amarillo.	Azul claro.	15,10	
19 38 20	12 56 50	Amarillo naranjado.	Azul obscuro.	14,25	
24 18 0	15 55 20	Verde.	Rojo vivo.	12,25	Orden 2.°
26 37 20	17 22 50	Azul claro.	Naranjado.	11,11	
33 22 20	21 30 50	Naranjado.	Azul claro.	9,00	
36 4 50	23 7 0	Amarillo pálido.	Azul obscuro.	8,17	
37 19 20	23 50 30	Blanco azulado.	Violado.	7,10	
37 50 40	24 8 30	Blanco verdoso.	Rojo castaño.	5,80	Orden 1.°
39 24 40	25 2 30	Blanco un poco azulado.	Naranjado.	5,11	
41 8 50	26 1 10	Blanco algo sucio.	Amarillo pálido.	4,60	
44 7 40	27 29 20	Negro.	Blanco brillante.	3,40	
51 25 0	31 24 30	Blanco brillante.	Negro ó azul muy obscuro.	0,00	Orden 1.°
58 18 10	34 33 20	Violado muy obscuro.	Blanco un poco amarillento.	3,40	
63 13 20	36 31 30	Azul claro.	Naranjado.	5,10	
66 11 40	37 35 0	Verde blanquizco.	Rojo castaño.	5,80	
70 56 20	39 3 30	Amarillo.	Azul obscuro.	8,20	Orden 2.°
75 24 10	40 10 40	Rojo.	Verde blanquizco.	9,71	

Volvamos ahora el sistema de modo que el eje de la lámina mas gruesa B quede perpendicular al plano de incidencia, é inclinemos B. Entonces la fuerza emanada de su eje permanecerá la misma, y aumentará el camino del rayo por el interior de su sustancia; la accion resultante de estos dos elementos será, pues, mayor; y como la de A permanece constante, la tinta quitada á la accion de la polarizacion primitiva bajará en el órden de los anillos. Asi lo manifiesta la tabla siguiente en que estan consignadas las observaciones hechas con las mismas láminas de que acabamos de hablar.

Incidencia observada. θ	Angulo de refraccion. θ′	Tinta observada del rayo ordinario.	Tinta observada del rayo estraordinario	Valor de E segun la tinta observada.	Orden de las tintas.
0° 0′ 0″	0° 0′ 0″	Rojo violado.	Verde amarillento.	17,00	Orden 3.°
7 12 0		Azul claro.	Amarillo pajizo.	17,50	
15 51 0		Verde.	Rojo.	19,67	
22 50 0	10 59 30	Rojo.	Verde vivo.	22,75	Orden 4.°
30 29 0	19 46 0	Verde.	Rojo.	26,00	
36 22 10		Rojo.	Azul verdoso.	29,67	Orden 5.°
42 11 30	26 35 50	Azul verdoso.	Rojo.	34,00	
46 7 30		Rojo.	Azul verdoso.	38,00	Orden 6.°
50 6 40	30 45 50	Azul verdoso.	Rojo.	42,00	
53 45 30		Blanco rojizo.	Blanco verdoso.	45,80	Orden 7.°
59 20 10	34 59 30	Blanco verdoso.	Blanco rojizo.	49,67	

En estas esperiencias las dos láminas cruzadas tenian sus ejes en la direccion del plano de sus superficies; pero esta direccion no es necesaria para producir colores por medio del cruzamiento; porque segun lo que acabamos de observar, los efectos que sufre la luz en cada lámina, no dependen sino de la longitud que tiene que atravesar, y de la direccion de su camino con respecto al eje del cristal, con absoluta independencia de las superficies naturales ó artificiales por donde entra ó sale. Podemos, pues, enunciar en general el resultado del modo siguiente, para que el cruzamiento de dos láminas produzca colores, basta que la diferencia de sus acciones esté contenida entre los límites de la tabla de Newton. Esta accion bajo la incidencia perpendicular es igual al grueso de la lámina reducido á la escala de Newton, multiplicado por el cuadrado del seno del ángulo que forma el eje con el plano de las superficies. Esta regla es tan exacta que puede servir para determinar la direccion justa del eje en las láminas, cuya naturaleza se conoce.

El efecto de la inclinacion se hace conocer, no solo en las láminas cortadas paralelamente al eje, sino que igualmente se verifica en cualquier otro corte que se dé á las láminas. En general, la direccion del rayo refracto relativamente al eje del cristal, y el tamaño de su camino en la sustancia cristalizada son los únicos elementos que determinan los efectos que sufre dicho rayo, y las propiedades que manifiesta despues de su emergencia bajo cada incidencia conocida. La direccion de las supeficies naturales ó artificiales por donde entra ó sale, no tiene absolutamente ninguna influencia.

Esto presenta un medio sencillo y directo para hallar la direccion del eje en cualquiera lámina cristalizada, colocando la seccion principal, que contiene su eje de modo que forme un ángulo de 45° con el plano primitivo de polarizacion, é inclinándole gradualmente en esta direccion, hasta llegar al punto en que el rayo refracto atraviesa la lámina exactamente en la direccion de su eje. En este caso, la fuerza, ya atractiva, ya repulsiva, que emana de este eje, es nula, y por consiguiente, lo es la polarizacion que produce, como si el cristal hubiese perdido la doble refraccion; y tanto un poco antes como un poco despues de esta incidencia exacta, aparecerán en el romboide imágenes de color, porque la debilidad de la accion del eje compensan la longitud del camino que tienen que andar las moléculas luminosas.

Pero ¿cómo descubriremos la direccion de la seccion principal de la lámina? Esponiéndola primero perpendicularmente al rayo polarizado, haciéndola girar en su camino plano, y determinando en sus superficies las dos direcciones rectangulares en que no altera la polarizacion primitiva. Una de estas direcciones es necesariamente la seccion principal, y no hay mas que esperimentarlas ambas sucesivamente, eligiendo aquella que produzca colores bajo una inclinacion conveniente.

el eje, se observará la incidencia en la division de la varilla, y segun la relacion de las fuerzas refringentes del cristal y del líquido, se deducirá la direccion del rayo refracto, y por consiguiente la del cristal que se esperimenta. Yo he aplicado este método hasta en láminas de espato de Islandia, que tenian muchos milímetros de grueso. Luego que se ha llegado á las inclinaciones que producen colores, se puede determinar al momento si el cristal es atractivo ó repulsivo, porque antes que el rayo transmitido llegue al prisma romboidal, no hay mas que hacerle atravesar una laminita de cristal de roca de uno ó dos milímetros de grueso, cortada paralela al eje, la cual se colocará sucesivamente en la direccion del plano de incidencia, y en la perpendicular á dicho plano. Esta lámina no produciria por sí misma imágenes de colores; pero se la harán producir inclinando convenientemente con relacion á ella la lámina que se quiere estudiar. Si estos colores se manifiestan cuando el eje de la laminita de prueba es paralelo á la seccion principal de la lámina cristalizada, esta será opuesta al cristal de roca, y por consiguiente, repulsiva, pero será atractiva, si es preciso colocar el eje del cristal de roca perpendicularmente al suyo.

Todas las consideraciones anteriores suponen que la lámina no posee mas que una sola especie de fuerzas polarizantes, á saber, la que depende de su cristalizacion. Pero no siempre es esto asi: en el sulfate de cal, por ejemplo, su constitucion luminosa produce fuerzas polarizantes que se hacen sensibles á medida que los rayos refractos se acercan á ser paralelos á las láminas; y estas fuerzas obrando conforme á otras leyes que las fuerzas principales, y no emanando del eje, como ellas, modifican sus efectos; de suerte, que si se inclina una lámina, por ejemplo, de sulfate de cal en la direccion de su eje; lo cual debilita la fuerza polarizante principal, las tintas E no por esto suben continuamente en el órden

Este método exije para ser seguro, que pueda introducirse el rayo en la lámina cristalizada bajo todos los ángulos posibles con respecto á sus superficies. Para esto, no siempre basta hacer las esperiencias en el aire, porque en virtud de la poca refraccion que produce este fluido los rayos que salen de él para entrar en un cristal, se acercan mucho despues de la reflexion á la normal á la superficie refringente. Este inconveniente se evita encerrando la lámina en un tubo TT, fig 10 cerrado con vidrios por sus dos estremos, y lleno de un líquido que produzca una refraccion considerable, como, por ejemplo, el aceite de trementina. Este tubo está atravesado lateralmente por una barilla que se puede hacer mover desde fuera, y cuyo estremo interior lleva una pinza en que se sujeta la lámina, de suerte que su plano esté en la colocacion de la varilla. En este caso, haciendo pasar un rayo polarizado por el líquido y la lámina, se puede colocar esta haciendo mover la varilla, bajo todas las inclinaciones que se quieren, y por consiguiente, introducir el rayo en su interior bajo todos los ángulos, á lo menos si el líquido refracto tanto ó mas que ella. Asi que entre todas estas inclinaciones se ha de descubrir necesariamente el eje.

Para bacer la esperiencia con comodidad, es necesario, luego que la lámina se halla puesta en el tubo, colocar este en el aparato universal de polarizacion, perpendicularmente al rayo polarizado; en seguida hacerle girar sobre su plano hasta que la lámina llegue á una posicion en que no altere la polarizacion primitiva; probar entonces si esta condicion se verifica en toda la rotacion de la varilla, y volver á colocar en ella la lámina si es necesario; despues sin quitar de allí el tubo, enderezarle, llenarle, cerrarle, colocar la seccion principal de la lámina á 45° de la polarizacion primitiva, y volver á empezar las observaciones. Cuando se haya hallado la posicion de la lámina en que el rayo pasa por

de los anillos; esto se verifica solo hasta cierto término, desde la incidencia perpendicular, en seguida las tintas permanecen un momento estacionarias, y despues la influencia creciente de las fuerzas secundarias las hace volver á bajar en el órden de los anillos, como si la lámina se hiciese mas gruesa. Esto es lo que manifiesta la tabla siguiente, en que he espresado la serie de los valores por donde pasa la tinta E de una lámina, que se espone sucesivamente á un rayo polarizado bajo diferentes inclinaciones, y de modo que su eje forme con la marca del plano de incidencia sobre su superficie diferentes ángulos designados por i en cada columna. Se ha tomado por unidad el valor numérico señalado en la tabla de Newton á la tinta E que la lámina sustrae á la polarizacion movible bajo la incidencia perpendicular.

Angulo de refraccion. θ'	$i=0.$	$i=22°30'$	$i=45°.$	$i=67°30$	$i=90°.$
0	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
10	0,99182	0,99337	0,99848	1,00553	1,00934
20	0,96891	0,97496	0,99502	1,02289	1.03802
30	0,93570	0,94858	0,99329	1,05303	1,08957
40	0,89842	0,91970	1,00025	1,11224	1,17473
50	0,86497	0,89492	1,02808	1,21280	1,31994
60	0,84815	0,88192	1,09665	1,39642	1.58769
70	0,88511	0,88974	1,20503	1,73927	2,14554
80	1,19644	0,92074	1,44033	2,33812	3,56163
90	infinito.	0,94307	1,57079	2,82360	6,17153

Se ve por esta tabla que por poco gruesa que fuese una lámina de sulfate de cal, seria inútil tratar de descubrir su eje inclinándola á un rayo polarizado, porque compensando la influencia de sus fuerzas secundarias la diminucion de las principales, impediria que las oscilaciones se hiciesen bastante lentas para producir hacecillos de colores. Pero este

inconveniente se evita haciendo mas delgada la lámina, lo que permite que los colores se produzcan bajo inclinaciones en que aun no es sensible la influencia de las fuerzas secundarias.

De la polarizacion por rotacion que se produce en el cristal de roca y en algunos fluidos.

No componiéndose el cristal de roca de hojuelas como el sulfate de cal, no tiene fuerzas secundarias de la misma naturaleza que este; pero las tiene de otra especie; las cuales se hacen sensibles, sobre todo, cuando es nula la fuerza principal, es decir, cuando los rayos refractos atraviesan las láminas paralelamente al eje. En esta posicion en que toda polarizacion deberia cesar, el rayo transmitido se halla aun modificado de modo que produce imágenes de color en el prisma romboidal que sirve para analizar la luz transmitida. Las tintas de estas imágenes siguen absolutamente otras leyes que las que producen las fuerzas polarizante principales. Desde luego, no sufren ninguna variacion de intensidad ni de color, aunque se haga girar la lámina del cristal de roca sobre su propio plano, permaneciendo fijo el prisma romboidal; y varian segun el órden de los anillos cuando se vuelve el prisma de derecha á izquierda ó de izquierda á derecha; y lo que es muy singular es que no varian en el mismo sentido respecto á todas las partes del cristal de roca, sino que mas presentan cuando se vuelve el prisma de izquierda á derecha, las mismas variaciones que otras cuando se vuelve de derecha á izquierda, sin que pueda reconocerse ninguna señal esterior de esta diferencia, ni en la cristalizacion, ni en la pureza de las láminas. Estudiando estos fenómenos en un gran número de láminas perpendiculares al eje, he hallado que sean progresivos, y que se verifican, como si los ejes de polarizacion de las moleculas

luminosas se moviesen no en *oscilacion*, sino en *rotacion* continua al rededor del eje, en unas láminas de derecha á izquierda, y en otras de izquierda á derecha. Ademas, el modo con que varian las tintas al paso que se vuelve el prisma romboidal, indica que las moléculas luminosas modificadas de este modo, se dirigen hácia la refraccion ordinaria ó hácia la estraordinaria, conforme á otras leyes que las moléculas simplemente polarizadas por reflexion ó por las fuerzas polarizantes generales, de donde se sigue que al pasar por el cristal en este sentido, han recibido una impresion fisica que conservan aun de pues de su emergencia, y que llevan consigo al espacio. Estas impresiones son contrarias en las láminas que hacen girar las moléculas en direcciones opuestas; y un rayo que ha atravesado sucesivamente dos de estas láminas de rotaciones inversas, no conserva sino la modificacion que se debe á su diferencia. En fin, si el rayo dirigido primero paralelamente al eje, se inclina poco á poco, dejando de ser nula la fuerza oscilatoria que emana de él, empieza á quitar á las fuerzas rotativas cierto número de moléculas luminosas, cuyo número aumenta con la inclinacion del rayo sobre el eje, hasta que todo ó casi toda la luz transmitida se sustrae á la rotacion.

La existencia de las fuerzas rotatorias, cuando son nulas las que emanan del eje, indica evidentemente que no son resultado de la cristalizacion. Asi es que Mr. Biot ha hallado en sustancias, no solo privadas de cristalizacion regular, sino aun perfectamente fluidas, como el aceite de trementina, el aceite esencial de limon, las disoluciones de alcanfor en el alcool; la de azucar en el agua &c. Los caracteres comunicados por estos fluidos á los rayos de luz son exactamente los mismos que producen las láminas de cristal de roca perpendiculares al eje, y se pueden observar del mismo formando láminas líquidas por medio de tubos cerrados por sus dos

estremos y llenos de estas sustancias, por las cuales se hace atravesar el rayo polarizado. Igualmente se reconoce entre las acciones de estas la misma oposicion que entre los diferentes pedazos de cristal de roca; porque el aceite de trementina hace girar la luz en un sentido, y la disolucion de alcanfor en otro, con diferentes intensidades; de suerte, que si se valúan estas por los métodos indicados en el tratado general, y se forman mezclas en que la masa de cada sustancia entre en razon inversa de su energía, los efectos opuestos se destruyen entre sí, y la polarizacion no se altera, ó mas bien se altera sucesivamente en cada partícula, de manera que los resultados de todas estas acciones se destruyen mútuamente en la longitud total recorrida por el rayo de luz.

De los ejes de la mica.

La mica es un cristal compuesto de hojuelas, que goza de la propiedad, hasta ahora descubierta en sola esta sustancia, de contener dos ejes, uno normal á sus láminas, y otro situado en el mismo plano de estas. Ambos ejes son repulsivos, pero son diferentes las intensidades de sus acciones; la del eje normal es la mayor, y es á la otra como 677 á 100. Es fácil concebir cuántas variedades debe producir esta combinacion en las tintas que producen las láminas delgadas de mica, cuando se esponen á un rayo polarizado, bajo diversas incidencias. Sin embargo, sus variaciones, al parecer las mas estrañas, siguen con la mas escrupulosa exactitud el órden de los anillos de Newton, y están sujetas á todas las demas leyes de la polarizacion movible.

Los ejes de la mica no se hallan bien decididos sino en los ejemplares que estan cristalizados regularmente; y no se encuentran en algunas láminas amarillentas de mica, cuya coloracion y transparencia defectuosa indican una cristalizacion

imperfecta. Entonces son nulas las acciones dirigidas en el plano de las láminas, como si los ejes que las producen se hallasen cruzados en todos sentidos, de modo que se compensasen mutuamente.

La mayor parte de los efectos ópticos de la mica se pueden imitar, formando artificialmente combinaciones de fuerzas polarizantes análogas á las suya, por ejemplo, sobreponiendo una lámina delgada de sulfate de cal paralela al eje, á otra lámina de cristal de roca perpendicular al eje, y prescindiendo de las fuerzas rotatorias de esta última. Si se inclina un sistema semejante en diferentes sentidos á un rayo polarizado, se forman reuniones y oposiciones de fuerzas, semejantes á las que presenta la mica, con la diferencia de que las acciones de estas fuerzas son sucesivas cuando en la mica son simultáneas, como que ambas son inherentes á cada partícula. Pero esta diferencia no altera sino las intensidades absolutas de los fenómenos, y no el progreso de sus alteraciones.

De los anillos formados por la polarizacion movible de las láminas de espato de Islandia perpendiculares al eje.

Las leyes de la polarizacion movible no se presentan en ninguna sustancia con mayor evidencia y exactitud que en el espato de Islandia bien puro. Hallándose entonces este hermoso cristal enteramente exento de fuerzas secundarias, se pueden seguir en él las consecuencias de la teoría en sus particularidades mas municiosas, y la esperiencia se manifiesta siempre perfectamente conforme á ellas. Solo sí la grande energía de sus fuerzas polarizantes exige que se tomen las disposiciones necesarias para atenuar sus efectos sobre las oscilaciones de las partículas luminosas, á fin de poder reducir las tintas á los límites de coloracion que la tabla de Newton señala. Esto se consigue evidentemente, cortan-

do el cristal por medio de dos secciones perpendiculares á su eje, y haciendo pasar los rayos polarizados en la direccion del eje mismo ó en direcciones que formen con él ángulos muy pequeños. Se podrá verificar á un mismo tiempo en diferentes casos, haciendo atravesar una lámina semejante á un hacecillo cónico de rayos polarizados en un mismo sentido, y que tengan por eje comun el de la misma lámina, porque entonces no sintiendo ninguna influencia de parte del eje el rayo infinitamente delgado que pase por él, deberá conservar su polarizacion primitiva, pero los inmediatos que forman ya con el eje un ángulo, aunque pequeño. empezarán á dividirse en dos hacecillos de color polarizados de diverso modo conforme á las leyes de las oscilaciones, y las tintas en que se resuelva cada uno de ellos variará á diferentes distancias del eje. pero igualmente todo al rededor de él; de suerte que si se analiza la luz transmitida por medio de un prisma romboidal, que tenga su seccion principal paralela al plano primitivo de polarizacion ó por medio de un vidrio inclinado de un modo conveniente y dispuesto de manera que no refleje la parte de las tintas que ha conservado su polarizacion primitiva, se deberá ver al rededor del eje una serie de anillos de color, concéntricos con él, que presentarán todos los colores que indica la tabla de Newton, puesto que son los mismos por donde la polarizacion movible hace pasar los hacecillos de luz. Todas estas inducciones se hallan en efecto perfectamente confirmadas por la esperiencia. La disposicion mas conveniente para observar el fenómeno, es la que representa la fig. 11 MM, es un gran disco de vidrio horizontal, y teñido de negro por detras, sobre el cual se polariza por reflexion un hacecillo grueso de luz blanca, el cual se recibe en seguida en un vidrio negro VV dispuesto de modo que no refleje nada de él. Se conoce que esta condicion se verifica, cuando colocando el ojo en O, y mirando

al vidrio VV se ve la superficie del disco M enteramente oscura. Dispuestas las cosas de este modo, se introduce en el camino de los rayos una lámina de espato de Islandia LL, cortada perpendicularmente al eje de cristalizacion, y se coloca de modo que reciba el hacecillo polarizado bajo la incidencia perpendicular. Entonces el ojo, fijo siempre en O, percibe en el vidrio VV una multitud de anillos de color concéntricos, separados en cuatro cuadrantes por una gran cruz negra, cuyos brazos van ensanchándose como las colas de los cometas, al paso que se separan del centro, de suerte que el todo presenta la forma que se ve en la fig. 12. Los mismos efectos se producen, y aun con mayor viveza, substituyendo á la luz del cielo la llama de una lámpara de corriente de aire, rodeada de un globo de vidrio esmerilado ó de una simple cubierta esférica de papel muy blanco, de modo que se forme un hacecillo grueso de luz, fig. 13. En este caso es mas cómodo disponer verticalmente el disco MM colocándole á la altura del centro de la llama, con lo cual el hacecillo reflejo es horizontal, y se puede introducir en él la lámina de espato de Islandia colocándola sobre un pie á la misma altura. Hallándose de este modo horizontal, el plano primitivo de polarizacion debe ser vertical el plano de incidencia sobre el vidrio VV, y el hacecillo polarizado debe formar en su superficie un ángulo de 35° 25.′

Si se examinan los colores de estos anillos, sobre todo cuando estan formados con la luz del cielo que es perfectamente blanca, se halla en el centro una mancha negra rodeada de un azul oscuro, que luego se cambia en un blanco azulado, despues en un blanco perfecto, y sucesivamente en amarillo pálido naranjado y rojo castaño, exactamente como en el primer anillo reflejo de Newton. Los colores de los otros anillos hasta donde se pueden percibir, siguen exactamente en el mismo órden. La cruz negra que estiende sus brazos rectangulares al traves

de todos los anillos, no participa de sus tintas, que vienen á perderse en ella con una degradacion rápida de intensidad.

El tamaño de estos anillos parece que varía con la distancia del ojo á la lámina cristalizada, aumentando cuando el ojo se separa y disminuyendo cuando se acerca; pero si se mueve el ojo paralelamente á la lámina, permanecen en el mismo estado y del mismo tamaño, cualquiera que sea el punto de sus superficies por donde se transmiten los rayos.

Tambien se producen efectos análogos haciendo pasar un hacecillo grueso de luz polarizada por un doble prisma de espato de Islandia, construido segun los principios esplicados en el capítulo 5.° de la dióptrica. Presentando á las moléculas luminosas el prisma perpendicular al eje, forma los anillos y el segundo los analiza, solo que en razon de ser el grueso desigual no son perfectamente circulares. Asi es como yo los he descubierto; pero habiéndome hecho conocer la causa la teoría, los produge al momento con láminas de un grueso igual, y los manifesté al instituto el 20 de noviembre de 1815. Tambien se pueden observar mirando al cielo por el doble prisma á causa de la polarizacion que la luz recibe por reflexion en las capas de aire.

CAPITULO VI.

Fenómenos de polarizacion que se observan en los cuerpos cristalizados imperfectamente.

Hasta aqui solo hemos estudiado sustancias cuya cristalizacion es regular y de una misma naturaleza en todo su grueso. En efecto, esta uniformidad era necesaria para que pudiésemos descubrir y fijar las leyes con que se verifica progresivamente la polarizacion; pero ahora que ya las conocemos es muy útil aplicarlas á los cuerpos cristalizados imperfecta-

propia colocacion; pues observando de este modo láminas delgadas de gelatina formadas de láminas delgadas de marfil, de que Mr. Darcet habia estaido toda la parte mineral por medio del ácido hidroclórico, he reconocido en ellas zonas de colores paralelas y regulares, correspondientes á direcciones simétricas de las partículas, que subsistian á un integrante despues de haber estraido el fosfate de cal, y las demas sales que formaban otros tantos sistemas intercalados entre ellas.

Considerando, pues, los cuerpos cristalizados imperfectamente, como compuestos de muchos sistemas regulares interpuestos unos entre otros, se pueden esplicar fácil y claramente todos sus efectos por las leyes de polarizacion que hemos establecido. Supongamos dos sistemas semejantes que egerciendo fuerzas de igual naturaleza é iguales intensidades, tengan sus ejes cruzados en ángulos rectos; sus acciones se compensarán mutuamente en cada elemento material formado por su conjunto, y resultará un cuerpo neutro, es decir, que no producirá ninguna separacion en los ejes de los rayos luminosos. Lo mismo sucederá, si en vez de dos sistemas semejantes concebimos un número cualquiera de ellos que se neutralicen de dos en dos. En fin, para que el cuerpo sea neutro, no es necesario ni aun que la compensacion sea exacta, pues basta que el esceso definitivo en cualquiera sentido que se halle, sea menor que la accion de una sola lámina correspondiente al grueso e' en que segun la tabla de Newton empiezan á ser sensibles los fenómenos de polarizacion; y esto es suficiente para concebir el estado neutro de algunas sustancias, como los líquidos, cuyas moléculas pueden suponerse repartidas uniformemente en todas direcciones. Los fenómenos de polarizacion que hemos observado en el capítulo anterior en algunos de estos cuerpos, no estan en oposicion con esta idea, pues aquellos eran producidos por fuerzas individualmente propias de

mente á fin de descubrir por los fenómenos que producen, como pueden influir la colocacion de las moléculas materiales, y su regularidad mas ó menos perfecta sobre la naturaleza y energía de la polarizacion que da su masa total á los rayos de luz.

Las primeras investigaciones hechas sobre este punto son las que Malus ha hecho sobre las sustancias orgánicas animales y vegetales, y que publicó en el boletin de la sociedad filomática. Esponiendo bajo diversas incidencias láminas delgadas de estas sustancias á un rayo polarizado, y analizando la luz transmitida por medio de un prisma romboidal, halló que todas indicaban ejes que sustraían una parte del rayo á la polarizacion primitiva. Lo mismo puede comprobarse con láminas delgadas de hasta, de marfil, en las partes transparentes de las plumas, en los cabellos, y en general en todo lo que es transparente y organizado de un modo regular. Pero sea en razon de la poca densidad de estas sustancias, sea que la especie de colocacion determinada por las fuerzas orgánicas es menos comprimida y regular que en los minerales, nunca se perciben señales de eje, sin observar al mismo tiempo los fenómenos de coloracion propios de la polarizacion movible, lo cual debe suceder en efecto, segun el modo progresivo aunque se verifica en todos los cuerpos. Es preciso, pues, para completar los resultados de Malus, unir á ellos esta particularidad de coloracion de que nada habla; aunque sin duda la ha percibido; tanto mas cuanto á aquella época la habia ya comunicado Mr. Arago su observacion; y aun se debe añadir tambien que la existencia de los ejes no puede percibirse siempre bajo la incidencia perpendicular, sino solamente inclinando las láminas al rayo polarizado. Parece que en la construccion de las sustancias orgánicas, cada sistema de moléculas materiales, que forma un todo aparte obra tambien separadamente sobre los rayos luminosos en virtud de su

las partículas materiales é independientes de las posiciones en que pueden hallarse colocadas, en vez de que los fenómenos que ahora nos ocupan dependen de su estado de agregacion.

Del mismo modo que acabamos de formar estados neutros por medio del cruzamiento de sistemas cuyas fuerzas sean de una misma naturaleza, se podrian formar con sistemas de naturaleza contraria colocando paralelamente sus ejes. Supongamos ahora que un cuerpo constituido de uno ú otro de estos modos, ó de ambos á un mismo tiempo, se vea obligado por una causa cualquiera á variar su modo de agregacion, y que esta variacion haga nacer una desigualdad sensible entre la energía de las acciones de los sistemas que le componen. Al momento producirá este cuerpo los fenómenos de la polarizacion movible, y presentará hacecillos de colores, si se le hace atravesar un rayo polarizado fijamente. Si la variacion producida en su estado de agregacion es uniforme y constante en toda su estension, este cuerpo producirá tambien por todas partes efectos semejantes, y en cualquier punto que el rayo le atraviese, solo se percibirán en las tintas en diferencias determinadas por las variaciones del grueso. Pero si unas partes se hallan mas modificadas que otras ó de un modo diverso, los colores variarán tambien en gruesos iguales, y esta variacion podrá estenderse hasta la direccion y naturaleza atractiva y repulsiva de la polarizacion. Se observan tambien fenómenos enteramente semejantes en el vidrio y demas cuerpos fundidos que se hacen enfriar rápidamente. Estos fenómenos, descubiertos primeramente por Mr. Seebeck, han sido despues desenvueltos y analizados por Mr. Brewster.

Para producirlos se hacen enrojecer láminas de vidrio, y se hacen enfriar de repente, ya sea en el aire, ya colocándolas de canto sobre una masa de metal frio. En seguida se busca un rayo grueso de luz polarizada, haciendo reflejar de un modo con-

veniente la luz del cielo sobre una gran lámina de vidrio ennegrecido ó la de una lámpara rodeada de un globo de vidrio esmerilado, figs. 11 y 13. Se recibe el hacecillo polarizado en un segundo vidrio negro dispuesto de modo que no refleje ninguna parte de él, exactamente como en las esperiencias que hemos hecho antes sobre los anillos de colores que se observan en las láminas de espato de Islandia perpendiculares al eje. Del mismo modo aqui, si se interpone entre ambas reflexiones una lámina cristalizada cualquiera ó en general un cuerpo capaz de producir la polarizacion movible, la reflexion se hace posible sobre el segundo vidrio, y se ve en él ya una sola tinta uniforme si la accion de la lámina interpuesta es constante en toda su estension, y á varias tintas diferentes si la fuerza de polarizacion es distinta en diversas partes de la lámina, suponiendo toda ella de un mismo grueso. Ahora bien, haciendo esta operacion con láminas de vidrio de superficies paralelas, preparadas como acabamos de decir, se observan sobre el segundo vidrio imágenes de colores, cuyas tintas diferentes en los diversos puntos de cada lámina, afectan casi siempre disposiciones regulares, determinadas y dependientes de la forma de la lámina y de la mayor ó menor rapidez del enfriamiento que se la ha hecho sufrir Una lámina cuadrada produce en sus cuatro ángulos, como cuatro ojos de pavo real, separados por una gran cruz negra,. fig. 14, una lámina rectangular oblonga, produce tambien cuatro ojos semejantes en sus cuatro ángulos, fig. 15; pero al mismo tiempo presenta varias bandas de colores cada una de una tinta uniforme, que se estienden por toda su longitud paralelamente á los lados mayores. Si la lámina es redonda se ven en ella anillos circulares concéntricos á sus bordes y separados en cuatro cuadrantes por una gran cruz negra, como los que hemos visto, fig. 12, en las láminas de espato de Islandia perpendiculares al eje; pero con

la diferencia de que en el espato, los anillos se movian al mismo tiempo que el ojo, y presentaban siempre las mismas apariencias, cualquiera que fuese el punto de la lámina por donde se verificaba el paso del rayo luminoso mientras en las láminas de vidrio circulares es fijo el punto en que se manifiesta cada anillo y permanece él mismo en todas las posiciones del ojo, lo cual indica que el estado de la lámina no es uniforme como lo era nuestro cristal. En fin, es muy digno de notar, que las imágenes producidas por cada lámina varían segun está cortada, porque si á una lámina cuadrada AB, fig. 14, se le quita uno de sus ángulos, se ve perder su forma á la imágen que presentaba y colocarse á lo largo de la curva que limita la parte quitadaanillos muy delgados, como representa la fig. 16. Si se hace esta misma operacion en los cuatro ángulos, y se redondea la lámina, gastando sus orillas sobre una piedra de afilar reproduce mas ó menos regularmente la fig. 12, que corresponde á una lámina redonda, y si cortándola de nuevo se la vuelve á dar su forma cuadrada vuelve á producir las apariencias que corresponden á esta forma.

Tales son los principales fenómenos descubiertos por Mr. Seebeck. Mr. Brewster, estudiándolos despues ha reconocido que las tintas eran las de los anillos de Newton, y que si se hacen girar las láminas en su propio plano el ángulo i, partiendo de la posicion en que el rayo transmitido conserva su polarizacion primitiva, la direccion de la nueva polarizacion se halla en el azimut $2i$ como en las láminas delgadas cristalizadas; los cuales son resultados necesarios, como que son comunes á todos los sistemas que producen la polarizacion movible, y su union nace de aquellas mismas leyes. Igualmente ha comprobado Mr. Brewster que si se sobreponen muhas láminas semejantes cuyas tintas sean E E″ colocándolas de modo que sus lados semejantes esten paralelos, la tinta E″ se halla espresada por la

suma de los números que representan á E y E′ en la tabla de Newton, y por el contrario colocándolas de modo que sus lados análogos se crucen á ángulos rectos la tinta E″ es igual á su diferencia. Estos fenómenos son tambien consecuencias necesarias de las leyes generales que hemos establecido antes, respecto á las láminas cruzadas cuyas acciones son de una misma naturaleza. Pero las apariencias que resultan en el caso actual merecen observarse por la exactitud con que convienen con la teoría. Para hacer bien la esperiencia, es útil tomar dos láminas que tengan exactamente el mismo contorno; si son cuadradas se ven multiplicarse sobre su superficie las líneas de colores correspondientes á los diferentes órdenes de anillos, quedando siempre en medio la cruz negra, sin mas diferencia que el que sus brazos se hacen mas delgados. En este caso cualquiera que sea el número de las láminas sobrepuestas y los lados que se sobrepongan los anillos se multiplican siempre, y las tintas estremas bajan en la tabla de Newton. Lo mismo sucede cuando las láminas rectangulares tienen sobrepuestos sus lados análogos, mas cuando los tienen cruzados á ángulos rectos, la oposicion de sus acciones produce la fig. 17, en que son hipérbolas las líneas de iguales tintas.

Todos estos fenómenos se comprenderán fácilmente, si se considera que el vidrio es una sustancia muy elástica, susceptible de temple como el acero por medio de un rápido enfriamiento, y que en este caso nos presenta todos los síntomas de un estado de agregacion violento, en el que todas las posiciones de las moléculas estan dependientes unas de otras, de tal modo, que separando una de ellas de su sitio, todas las demas se desunen al momento, con esplosion. Este fenómeno, tan conocido en las lágrimas batávicas, es muy sensible en las láminas de vidrio que despues de calentadas hasta enrojecerse se colocan de canto sobre una masa metálica

de vidrio, produciendo sobre ellas una presion pasagera, de suerte que los colores aparecen mientras dura la presion, varían con ella, y desaparecen cuando deja de existir. Esto acaba de confirmar nuestro modo de ver. Mr. Seebeck habia llegado tambien por su parte, aunque mas tarde, á obtener este último fenómeno. Las variaciones rápidas y desiguales de temperatura tienen una ifluencia semejante sobre las láminas de vidrio; las cuales, presentadas al rayo polarizado cuando se hallan todavia completa y uniformemente rojas, no obran sobre él; pero se ven aparecer los colores al paso que empiezan á enfriarse, como ha observado Mr. Seebeck, y se presentan primeramente en los parages que son los primeros á enfriarse. La introduccion del calor obra del mismo modo, y se reconoce colocando una lámina metálica muy caliente paralela al rayo polarizado, y colocando de canto sobre esta lámina otra de vidrio bien recocido, fig. 18. Esta última que estando fija, no hacia aparecer ningun color sobre el vidrio negro, los hace ver al momento que el calor del metal empieza á propagarse en ella de un modo sensible. Esta curiosa esperiencia se debe á Mr. Brewster.

Este mismo físico ha tenido el feliz pensamiento de examinar la influencia de la presion y de la desigualdad de temperatura en las láminas cristalizadas paralelas al eje de cristalizacion, y espuestas á un rayo polarizado de modo que las atraviese por el mismo eje, ó formando con él un ángulo muy pequeño. Entonces ha visto fenómenos de coloracion semejantes á los que se verifican en el vidrio, y ha observado que inclinando las láminas cristalizadas para desenvolver su fuerza polarizante propia, se modificaban los colores producidos por la presion. En efecto, deben serlo, como lo serian por la accion de cualquiera otra fuerza polarizante bastante débil para no poderlos hacer salir de la tabla de Newton; pues si saliesen de ella, no se producirian

fria; pues esta operacion las templa de tal modo que se hacen por ella duras, quebradizas, y casi es imposible trabajar en ellas sin que se rompan, formando una esplosion. Luego, si en el estado ordinario de agregacion que puede producir un enfriamiento progresivo, las acciones polarizantes sucesivas de todas las partículas del vidrio se compensan respecto á un rayo que atraviesa su sistema, no podrán ya compensarse cuando se substituya el estado forzado de que acabamos de hablar; y entonces deberán resultar todos los fenómenos de la polarizacion movible con una intensidad mas ó menos viva, segun la mayor ó menor regularidad de la agregacion. Asi es que estos fenómenos se observan tambien en las lágrimas batávicas cuando se pueden pulimentar sin romperse, del mismo modo que se ven en las demas láminas de vidrio que se han enfriado repentinamente. Por el contrario se hacen desaparecer del todo, aun en las masas que los producen con mayor fuerza, calentándolas de nuevo hasta enrojecerlas, y haciéndolas enfriar con mucha lentitud, y con todas las precauciones necesarias para que la pérdida de calor sea lo mas uniforme que sea posible en todos sus puntos. Asi lo ha hallado Mr. Seebeck, y Mr. Biot lo ha comprobado despues.

En general, se concibe que cualquiera causa que determine un estado forzado de las partículas, será igualmente á propósito para producir estos fenómenos. Asi, Mr. Seebeck los ha obtenido igualmente, con láminas de borax fundido y hecho enfriar con rapidez, con láminas de muriate de sosa desecadas rápidamente, y con láminas de goma arábiga obtenidas por medio de una pronta evaporacion. Yo creo que á esto mismo deben atribuirse las señales de polarizacion encontradas por Mr. Brewster en algunos pedazos de cristales que por su naturaleza no poseen la doble refraccion. En fin, Mr. Brewster ha comunicado las mismas propiedades á láminas de gelatina animal, y aun á láminas

ya sino imágenes blancas y no podria percibirse la influencia de la presion. Por esta causa no habian podido los fisicos desenvolver colores de esta manera, en las láminas cristalizadas cortadas en otras direcciones, pero para hacerselos producir basta, como he hecho ver, cruzar estas láminas con alguna otra cuya accion sea poco diferente de la suya, de modo que el efecto total del sistema de tintas que se hallen comprendidas en los límites de la tabla de Newton. Si en este caso se comprime una de las dos láminas, se manifiesta en las tintas la influencia de la presion, y su efecto se hace sensible como en las láminas no cristalizadas. Estas esperiencias las he publicado en los *anales de química y de física*, dicienbre de 1816.

CAPITULO VII.

Determinacion de las leyes, con que se polariza la luz en la superficie de los metales.

Cuando Malus descubrió la polarizacion que sufre la luz al reflejarse en la superficie de los cuerpos diáfanos, reconoció tambien que este fenómeno no se verificaba, á lo menos del mismo modo, en la superficie de los metales. Despues de esta época, memorable para las ciencias, volvió á estudiar dos veces esta escepcion singular; y sin duda alguna si no le hubiese faltado el tiempo, hubiera conocido la necesidad de modificar las primeras ideas que habian anunciado, y no se le hubieran ocultado las verdaderas leyes de la polarizacion metálica.

Antes de tratar de descubrirlas recordemos que en general se verifican dos especies de reflexion en la superficie de los cuerpos; una que parece producirse fuera de su sustancia, que obra indistintamente sobre todas las moléculas luminosas, y produce un rayo blanco, si es blanca la luz incidente, y la otra mas interior, que obra solo sobre las mo-

léculas luminosas que componen la tinta propia del cuerpo. La primera, bajo cierta incidencia, polariza siempre en gran parte la luz en la direccion del plano de reflexion al modo de los cuerpos diáfanos, y la segunda, al contrario, no produce este efecto, ó á lo menos le produce con una intensidad mucho menor. De aqui es fácil inferir que si se dispone un vidrio de modo que transmita ó absorva la primera especie de luz, reflejará la otra, y podrá verse el cuerpo con su propio color, sin ninguna mezcla de blancura estraña. Este método, aplicado á la observacion de las tintas reflejas en las láminas de sulfate de cal, ha servido igualmente para poner en claro los colores propios del oro, el hierro, y el cobre; pero entonces creía yo que la parte de luz de que se componen estos colores salia de los cuerpos con una polarizacion enteramente confusa; mas Mr. Arago ha observado que una parte muy considerable de ella sale hácia todas partes, polarizada paralelamente á la superficie de los cuerpos, y perpendicularmente al plano de emergencia, como se puede comprobar fácilmente analizando esta luz en un cuarto obscuro con una lámina de turmalina. Nada mas que esto sabiamòs sobre el modo de polarizacion que ejercen los metales, cuando me escribió Mr. Brewster, que haciendo reflejar muchas veces sobre láminas de plata ú oro un rayo de luz, polarizado primitivamente, esta luz se modificaba de modo, que analizándola con un prisma de espato de Islandia, se dividia en dos hacecillos de diferentes colores. Yo me apresuré á comprobar esta notable observacion, por medio de un aparato general, fig. 2, colocando tales láminas en el camino de un rayo polarizado; y para distinguir mejor la naturaleza de las tintas, hice caer sobre el primer vidrio la luz blanca del cielo. Variando entonces las incidencias de los rayos sobre las láminas, me fue fácil reconocer que las tintas en que se dividia el hacecillo reflejo, eran precisamente las de los ani-

llos de colores reflejos y transmitidos; y que tanto baja este aspecto, como en cuanto al sentido de la polarizacion, estos fenómenos seguían absolutamente las leyes de la polarizacion movible que se observan en las láminas delgadas cristalizadas. La analisis de estos efectos condujo á ver, que la plata y demas metales modifican la luz que reflejan, exactamente lo mismo que los cristales de doble refraccion modifican la que refractan, correspondiendo el número de reflexiones sucesivas al mayor ó menor grueso del cristal. Pero el modo de preparar la superficie metálica tiene una grande influencia sobre los resultados.

De dos modos puede darse el pulimento á un metal; con el martillo ó por medio del frotamiento. El primer modo consiste en batir la lámina metálica sobre un ayunque pulimentado con un martillo que lo esté tambien; acabando despues de dar el brillo á la superficie frotándola con un pedazo de ante impregnada de un polvo muy fino. Este método aplicado á la plata, la da una blancura estraordinaria; pero las imágenes reflejas son siempre un poco ondulosas, y como redondeadas en los estremos. En la abundante reflexion de luz que se verifica no es posible reconocer el pulimento vivo y brillante de los espejos.

El método de frotamiento es el que se usa para los espejos de telescopio. Se desgastan primero sobre una piedra azul de un grano muy fino, y se les acaba de dar el brillo de su superficie frotándolos sobre pez cubierta de estaño calcinado; en cuyo caso, si el trabajo ha sido bien hecho, las imágenes son claras, vivas, y la reflexion tiene toda la apariencia especular.

Ahora bien, por una propiedad muy digna de observarse, estas dos especies de pulimento no obran del mismo modo sobre la luz incidente. No hablo de la mayor ó menor cantidad de luz que reflejan, sino del modo con que obran sobre las moléculas

luminosas, y del sentido en que las polarizan. Cuando la superficie de la plata ó de otro metal cualquiera, ha recibido el pulimento especular produce dos efectos distintos por la reflexion regular. Comunica á una parte de la luz incidente la polarizacion movible al rededor del plano de incidencia, es decir, que hace oscilar las partículas á un lado y otro de este plano, del mismo modo que una lámina cristalizada de poco grueso, y cuya fuerza polarizante es débil, las hace oscilar á una y otra parte de su seccion principal; y tanto en un caso como en otro, las tintas pasan por toda la serie de los anillos reflejos y transmitidos de Newton. Pero además, la superficie metálica comunica á una parte blanca de la luz incidente, la polarizacion fija en el plano de incidencia, del mismo modo que una lámina cristalizada gruesa, cuya fuerza de polarizacion es enérgica, dá á la luz que la atraviesa la polarizacion fija en dos direcciones rectangulares; y asi como en todos los cuerpos cristalizados hemos hecho ver que las moléculas luminosas pasan progresivamente de la polarizacion movible á la polarizacion fija, cuando han penetrado hasta cierta profundidad; asi tambien en cada reflexion entre láminas metálicas se observa que una parte de la luz que habia adquirido la polarizacion movible en las reflexiones anteriores, pasa á la polarizacion fija que no puede ya dejar nunca, mientras las reflexiones siguientes continúen verificándose en el mismo plano; de suerte que en este caso, despues de un número mayor ó menor de reflexiones, segun la naturaleza del metal y el pulimento que se le ha dado, se debe hallar y en efecto se halla casi toda la luz polarizada fijamente en el plano de reflexion. En la reflexion sobre el acero, y probablemente sobre todos los metales que adquieren un pulimento especular muy vivo, la parte de luz blanca sustraida á la polarizacion movible es sin comparacion la mayor; de suerte que el fenómeno de los colores, que

solo puede producirse por la polarizacion movible, se hace insensible, ó no puede percibirse sino en ciertas posiciones particulares, que solo la teoría puede indicar. Asi es que Mr. Brewster me habia anunciado al principio que este fenómeno no se verificaba en el acero, ni en la aligacion que sirve para los espejos; pero guiándome yo por las indicaciones de la teoría, he llegado á observarle de un modo nada equívoco aun en el acero mejor pulimentado; y Mr. Brewster me ha escrito despues, que él habia obtenido el mismo resultado, y habia llegado á reconocer la polarizacion en el azimut doble. Cuando se emplean láminas de plata, que han recibido el pulimento especular, la parte de luz que adquiere en cada reflexion la polarizacion fija, es aun bastante considerable, pero mucho menor que en los dos metales de que acabamos de hablar. Por una compensacion necesaria es mucho mayor la parte de luz que adquiere la polarizacion movible, y el fenómeno de las tintas se presenta muy hermoso y muy fácil de observar. Mas siendo la direccion de la polarizacion del hacecillo blanco exactamente intermedia entre las de los hacecillos de colores, resulta que se mezcla aun con ellos en la refraccion producida por el romboide, y solo refractándolos en direcciones particulares que indica la teoría se puede poner enteramente en claro la ley que siguen sus tintas. En fin, esta dificultad desaparece casi enteramente en las láminas de plata pulimentadas á martillo, pues entonces la parte de luz que en cada reflexion adquiere la polarizacion fija, es muy pequeña en comparacion á la que conserva la polarizacion movible, á lo menos cuando no se presentan las láminas á los rayos incidentes con una grande oblicuidad; pues en este caso sabemos que todas las superficies planas, aun las que se ha privado á propósito del pulimento, toman el especular. Asi que, evitando las últimas inclinaciones, y limitándose á reflexiones poco numerosas, solo se perciben las le-

yes de la polarizacion movible, y las tintas de los hacecillos, que nada altera, se desenvuelven con la mayor regularidad, siguiendo el órden de los anillos. Por fortuna este caso fue el primero que se presentó á mis observaciones, y me sirvió de guia para pasar al caso mas compuesto, en que se manifiesta menos la polarizacion movible, haciendose mayor la polarizacion fija. Ahora bien, puesto que la sola diferencia de un pulimento mas ó menos brillante determina con mas abundancia el paso de la luz refleja de uno á otro de estos estados, no deberemos inferir que aqui del mismo modo que en los cristales de doble refraccion, la polarizacion movible es la primera que se verifica en las moléculas luminosas, cuando se hallan á bastante distancia de la superficie reflejante, para que sean insensibles las asperezas de ésta, á la distancia á que se hallan; pero disminuyendo siempre la distancia, y haciéndose por lo mismo mas sensible el efecto de aquellas asperezas, llega el caso de que si son muy pequeñas, la fuerza reflejante adquiere bastante energía para hacer tomar la polarizacion fija á una gran parte de las moléculas luminosas; en vez de que si estas asperezas son mayores, y por consiguiente mas débil la fuerza reflejante, continúa sus oscilaciones, sin fijarse, un número mayor de partículas. Tenemos, pues, aqui en la accion de los cuerpos sobre la luz el ejemplo de un efecto análogo á los de la capilaridad; porque si, como ha manifestado Mr. Laplace, estos últimos son producidos por la atraccion mas ó menos fuerte que ejerce un cuerpo en su superficie, segun es plana, ó cóncava ó convexa, del mismo modo en los nuevos fenómenos de que tratamos la diferente configuracion de las superficies reflejantes ejercen un modo distinto de polarizacion sobre las moléculas luminosas. Pero los fenómenos de la capilaridad se producen por diferencias de curbatura, apreciables á nuestros sentidos, y aun á nuestros intrumentos; en vez de que

para alterar la accion de los cuerpos sobre la luz es necesario producir ondulaciones casi imperceptibles, como los que da la diversa naturaleza del pulimento. Y tal vez no se hubieran podido obtener nunca tales efectos en los fenómenos ordinarios de refraccion, porque se verifican á distancias demasiado pequeñas, mientras se hacen posibles en los fenómenos de polarizacion, que dependiendo de las fuerzas reflejantes, se ejercen á distancias mucho mas considerables, como lo hemos probado en muchas esperiencias esplicadas anteriormente.

Aplicacion de los principios precedentes á la construccion de un colorigrado comparable.

En las ciencias físicas se presentan frecuentemente ocasiones en que es necesario designar los colores. La historia natural, por ejemplo, tiene muchas veces necesidad de especificar de este modo los animales, plantas ó minerales que describe: la química los productos que forma: la física las particularidades de los fenómenos que observa. Asi los naturalistas, á quienes principalmente es útil esta especie de observaciones, han conocido hace mucho tiempo la necesidad de darlas exactitud, y de hacer comparables entre sí los resultados en cualquiera parte que se observen. Entre los franceses Mr. de Lamarck y despues Mr. Mirbel han tratado por diversos medios de verificar esta condicion, fundándose en la definicion sistemática de cierto número de tintas, bastante próximas unas á otras para poder referir á ellas con una exactitud suficiente todos los colores de los cuerpos naturales. Aun Mr. Mirbel ha dado en su interesante obra de botánica un cuadro iluminado con todas estas tintas; y otros cuadros semejantes, aunque fundados en distintos principios, se hallan en todas las obras mineralógicas de la escuela de Werner. Pero aunque estos métodos ofrecian ya socorros muy útiles para limitar

hasta cierto punto la arbitrariedad de las definiciones, sin embargo, sus mismos autores no los han presentado sino como aproximaciones que dejaban aun desear una aproximacion mas exacta. Habiendo, pues, invitado Mr. Latreille á hacer esta investigacion á Mr. Biot, trató de corresponder á sus deseos, y construyó con este objeto un instrumento, á que ha dado el nombre de *colorigrado*, porque en efecto realiza y fija de un modo invariablemente constante y comparable todas las tintas que pueden presentar los colores naturales.

Para concebir el principio en que se funda este instrumento es preciso recordar que segun los principios de Newton todos los colores que reflejan los cuerpos naturales, son y deben ser necesariamente uno de los que presenta la serie de los anillos de colores formados por reflexion en las láminas delgadas de los cuerpos. Esta identidad no está fundada, como se ha creido mucho tiempo, en una comparacion hipotética, sino en una analisis fiel y rigorosa de las propiedades fisicas de la luz, y de las condiciones que determinan su transmision y su reflexion. Asi, la esperiencia confirma con la precision mas escrupulosa todas las consecuencias que se derivan de esta analogía con respecto á las modificaciones que deben sufrir los colores de los cuerpos, ya por la mayor ó menor oblicuidad de los rayos incidentes con su superficie, ya por el cambio lento y gradual de sus dimensiones, ó de la composicion química de las partículas que los componen. Newton nos habia dado muchos ejemplos acerca de esto, y en el capítulo 7.º del libro 6.º se han podido ver todos los que presenta la química de la naturaleza y la de nuestros laboratorios. Síguese de aqui que para reproducir como se quiera todos los colores que reflejan los cuerpos naturales basta reproducir sucesivamente, y por úna gradacion lenta y siempre la misma, todos los colores que componen la serie de los anillos reflejos. Re-

mado por estas dos líneas, y de la longitud del camino, durante el cual se hallan espuestas á su accion. Los dos sentidos de polarizacion que resultan de aqui, y que por consiguiente presentan dos tintas de los anillos, se observarán, pues, analizando la luz despues que salga de la lámina por medio de un cristal de doble refraccion. Para ver estas dos tintas con todo su brillo, y perfectamente separadas una de otra, es necesario, segun la teoría, colocar fijamente el prisma cristalizado en una de las posiciones en que no divide el rayo polarizado incidente, é inclinar la lámina cristalizada 45° sobre el plano primitivo de polarizacion de este rayo. Entonces, la tinta que al atravesar la lámina haya perdido su polarizacion primitiva, será la de uno de los anillos reflejos, y la que haya conservado su polarizacion será la del anillo transmitido correspondiente. Si se ha tomado para luz incidente la luz blanca del cielo, sobre todo si se halla bien iluminado por el sol, se verán las dos tintas en toda su belleza; é inclinando gradualmente la lámina se les hará producir toda la serie indicada en la tabla de Newton.

Este efecto se consigue exactamente con el aparato universal de polarizacion representado en la fig. 2. El que tenga este instrumento podrá producir fácilmente, y segun quiera, todas las variaciones de las tintas, y fijar por una comparacion directa la que le parezca idéntica á la del cuerpo que tiene á la vista. La indicacion de esta tinta en la tabla de Newton, ó en términos intermedios, la denotará de un modo perfectamente seguro, y tal, que se podrá siempre reproducir su equivalente.

Un instrumento de esta especie es, pues, en realidad un colorigrado perfecto; pero como es caro y voluminoso, se ha tratado de simplificarle haciendo su uso mas limitado. Tal es el instrumento portátil que representa la fig. 19.

Se compone de un vidrio negro colocado de-

ducido el problema á este punto, es muy fácil de resolver, porque todas las esperiencias que acabamos de hacer prueban que las moléculas luminosas espuestas á la accion de las fuerzas polarizantes de los cuerpos cristalizados sufren al penetrar en ellos alternativas de polarizacion exactamente correspondientes á las intermitencias de la reflexion y transmision, periódicas como ellas, y que varían segun la refrangibilidad respecto á las diferentes moléculas luminosas exactamente en la misma proporcion; y segun esto debe suceder y sucede en efecto, que si la luz incidente es blanca, los sistemas de partículas que tomen una ú otra polarizacion á cada profundidad, formarán una tinta enteramense semejante á las que se hallarian en la transmision ó reflexion en una fase correspondiente, es decir, que las tintas de los hacecillos polarizados deberán ser idénticas á las de los anillos transmitidos y reflejos. No se trata, pues, mas que de realizar esta sucesion de resultados en una escala bastante considerable para hacerlos fácil de observar, esto es, empleando fuerzas polarizantes muy débiles al principio, y cuya accion pueda aumentarse gradualmente. Este objeto puede conseguirse, ya haciendo atravesar un rayo polarizado por dos láminas cristalizadas, cuyas acciones casi iguales esten dispuestas de modo que se destruyan mútuamente, ya cortando de un cristal una lámina perpendicular al eje de doble refraccion, esponiendo perpendicularmente esta lámina á un rayo polarizado, é inclinándola gradualmente sobre su direccion. Porque en la posicion perpendicular, atravesando el rayo de luz la lámina paralelamente á su eje, será nula la accion polarizante que emana de este eje, y por consiguiente conservará su polarizacion primitiva; pero por poco que se incline la lámina, como el rayo refracto se hace oblicuo respecto al eje, nacerá de este una fuerza polarizante, cuyo efecto sobre las moléculas luminosas dependerá del tamaño del ángulo for-

iante de un tubo de anteojo, el cual se inclina por medio de un tornillo, de modo que los rayos reflejos en su superficie entren polarizados en el tubo. Se conoce que se verifica esta condicion, cuando analizando el hacecillo reflejo por medio de un prisma de espato de Islandia acromatizado, que hace veces de ocular, se hallan cuatro posiciones del prisma en que el rayo no se divide, sino que se refracta todo él en una sola direccion. Hecho esto, para producir los colores, hay entre el vidrio negro y el prisma una lámina cristalizada, cortada perpendicularmente al eje, y que por un movimiento de rotacion puede inclinarse bajo diferentes ángulos, pero siempre en un plano de incidencia que forme con el plano de reflexion sobre el vidrio negro un ángulo de 45°. Entonces aparecen los colores de los anillos, y varían al paso que se inclina la lámina como en la esperiencia descrita antes.

Para obtener estas variaciones lentas de las tintas es preciso emplear láminas de muy poco grueso, y hechas de cristales, cuyas fuerzas polarizantes sean débiles. El cristal de roca es muy á propósito para este objeto, y Mr. Cauchois, que ha construido este instrumento con su acostumbrada habilidad, ha adaptado á él varias láminas de esta especie que han producido un efecto asombroso. Pero para esto es una condicion indispensable que las láminas tengan en todas partes un grueso exactamente igual, porque las tintas dependen á un mismo tiempo de la intensidad de la fuerza polarizante, y de la longitud de la línea por donde atraviesa la lámina. Si la lámina no es exactamente igual, variará la naturaleza de las tintas en sus diversos puntos, y en vez de un disco de un color homogéneo se observará una variedad de tintas inmediatas que perjudicarán á la exactitud de las determinaciones.

Como puede suceder que no se halle en todas partes un artista bastante hábil para construir de este modo láminas exactamente paralelas, se ha trata-

do de suplir este inconveniente por el conocimiento de las leyes que siguen las fuerzas polarizantes, y se ha hallado el medio de producir los mismos efectos con láminas delgadas de mica, que la naturaleza nos presenta siempre en un estado hojoso, en que es muy fácil la division. Ya hemos dicho antes que la mica presenta la singularidad, hasta ahora única, de tener dos ejes, de que emanan fuerzas polarizantes, uno perpendicular al plano de las láminas, y otro colocado en este mismo plano. Hemos dicho tambien que uno y otro son repulsivos, y que el eje normal es mas enérgico que el otro en la razon de 677 á 100. Esta combinacion de fuerzas produce fenómenos muy compuestos; pero pueden simplificarse y reducirse al caso ordinario de los cristales que no tienen mas que un eje situado en el plano de las láminas por métodos que indican las leyes de la polarizacion. Para esto es necesario elegir una lámina de mica bien trasparente y de un grueso uniforme, lo cual se conoce en la uniformidad de las tintas en que divide los rayos polarizados que la atraviesan por diferentes puntos. Reconocida esta uniformidad se cortará una parte de la lámina en forma de rectángulo, cuyo lado mayor sea doble que el otro, fig. 20, y se dividirá este rectángulo en dos cuadrados iguales que se sobrepondrán uno á otro, cuidando de que los límites de su seccion comun formen ángulo recto, y se pegarán con una capita de aceite de trementina hecho espesar á la lumbre. Entonces, en virtud del modo con que se verifica la polarizacion movible, se hallará que el rayo transmitido no sufrirá ninguna despolarizacion por parte de los ejes cruzados, pues el de la segunda lámina conduce á la polarizacion primitiva las moléculas que el primero habia separado de ella. No quedará, pues, definitivamente mas que los efectos producidos por las acciones del eje normal en cada lámina, los cuales, siendo de igual naturaleza y obrando en una misma

direccion, se añadirán una á otra en los resultados, como si el sistema no formase sino una sola lámina mas gruesa, la cual tuviese solo un eje normal; asi que bajo la incidencia perpendicular, y aun hasta una oblicuidad de algunos grados, este sistema no se astraerá ninguna molécula luminosa á su polarizacion primitiva. Inclinándola mas empezará á aproducir un hacecillo estraordinario de un azul ligero y blanquizco, como el del primer órden de anillos; y blanqueando mas y mas este azul al paso que se incline el sistema, se transformará al fin en el blanco del primer órden, de donde pasará al amarillo pálido, al naranjado, al rojo oscuro, y asi sucesivamente, recorriendo todas las tintas señaladas en la tabla de Newton.

No solo se hallan asi realizadas las tintas principales de dicha tabla, sino tambien sus intermedias, y el paso gradual de una á otra. Al mismo tiempo el hacecillo que conserva su polarizacion primitiva presenta á cada instante la tinta del anillo transmitido correspondiente, y por poco unida que sea la luz incidente, cada serie presenta un brillo tal, que el ojo no puede mirarlas de seguida mucho tiempo.

Segun el poco grueso que tienen ordinariamente las láminas de mica, su sistema solo no puede hacer bajar las tintas sino hasta cierto término de la tabla de Newton. Pero añadiendo en el camino del rayo una lámina pequeña de sulfate de cal, que da la tinta inmediatamente consecutiva, se puede seguir la serie á todos los términos de la tabla, y obtener todos los grados de coloracion.

Para que la accion normal de las las láminas de mica se una á la de la lámina de sulfate de cal es necesario que el eje de esta última sea perpendicular al plano de incidencia á que se inclinan las láminas de mica: porque, como hemos dicho ya, la accion de los ejes de esta es repulsiva, y por el contrario es atractiva la del sulfate de cal, de suer-

te que la suma de las acciones se obtiene por el cruzamiento de las secciones principales. El paralelismo de estas secciones produce la diferencia de las acciones; y para obtenerla no hay mas que poner la lámina de sulfate de cal en una direccion perpendicular á la que antes hemos dicho. Entonces, disminuyendo la inclinacion progresiva de la lámina de mica el efecto de la de sulfate de cal, hace contínuamente subir las tintas en el órden de los anillos, y reproduce asi en un órden inverso las mismas tintas que hubiera producido por sí solo el sistema de mica. En el aparato pueden indicarse estas dos direcciones de la lámina de sulfate de cal sobre el diafragma en que se coloca por medio de los signos + y —.

Asi, además de su uso para producir sucesivamente todas las tintas de los anillos, este aparato puede servir tambien para comprobar todos los fenómenos que hemos dicho que resultan de la combinacion ú oposicion de las fuerzas polarizantes producidas por las diferentes láminas cristalizadas que se hacen atravesar á un mismo rayo de luz polarizado; y en general puede servir para hacer un gran número de esperiencias curiosas que presenta la polarizacion. Este estudio producirá tambien la ventaja de familiarizar en poco tiempo á los observadores con el conocimiento de las difentes tintas que componen la tabla de Newton, las cuales, en virtud de su misma composicion, y del órden con que se suceden, presentan caractéres que hacen sumamente fácil su conocimiento, de suerte que á la simple vista puede decirse que tal amarillo ó tal verde es de este ó de aquel órden sin miedo de equivocarse: pero lléguese ó no á adquirir esta facultad de reconocer desde luego las tintas, siempre será posible fijarlas de un modo exacto por medio del colorigrado, enunciando la tinta de Newton á que se refieren, y caracterizando el matiz de esta tinta por el del anillo transmitido que se presenta

simultáneamente. En fin, si se aspirase á una exactitud aun mas rigorosa, no habria mas que enunciar la incidencia precisa á que aparece la tinta de que se trata, cuidando de indicar al mismo tiempo aquellas á que se presentan con mas claridad algunas tintas conocidas de la tabla de Newton; pues por medio de estos datos se podria calcular exactamente la incidencia que reproduciría la misma tinta en cualquiera otro instrumento, lo cual hace rigorosamente comparable este método de observacion.

Ultimamente, por medio de una modificacion muy sencilla, puede servir el colorigrado para fijar de un modo exacto el grado mas ó menos oscuro del azul del cielo, el cual varía segun el clima y el estado del aire. Para esto se hace girar el sistema de las láminas de mica, hasta que dejen de interponerse en el camino del rayo polarizado, y se coloca en su lugar una lámina de cristal de roca, cortada perpendicularmente al eje, y como de tres milímetros de grueso. Esta lámina presentada bajo la incidencia perpendicular no ejerce ninguna accion polarizante emanada de su eje, pero se desenvuelven en ella otras fuerzas independientes de la cristalizacion, que son las mismas que se han hallado despues en ciertos fluidos. En el grueso que se acaba de decir el efecto de estas fuerzas produce en el rayo transmitido un cambio de polarizacion que da una imágen estraordinariamente blanca, cuando se analiza con un prisma cristalizado, cuya seccion principal sea paralela al plano primitivo de polarizacion. Haciendo girar este prisma de derecha á izquierda ó de izquierda á derecha, segun la naturaleza de la fuerza que posea la lámina que se usa, la imágen blanca pierde gradualmente sus rayos menos refrangibles, y pasa asi del blanco azulado á las diferentes tintas del azul claro, el oscuro, y aun casi al violado. Una division circular dispuesta al rededor del tubo del colorigrado, sirve para medir el número

de grados que es preciso girar para llegar á este último término, y todos los grados intermedios fijan otras tantas tintas de azul mas ó menos oscuro, las cuales se reproducirian exactamente en cualquiera otro instrumento en el mismo grado de rotacion, si fuese igual el arco total recorrido hasta el violado, ó á números proporcionales de grados, si el arco total fuese diferente.

Los dos instrumentos que acabamos de describir, tendrán, pues, respecto á los colores las mismas ventajas que presenta el termómetro para la determinacion de las temperaturas, es decir, que por su medio, los colores vistos y designados por un observador, podrán reproducirse exactamente por todos los demás, con sola la esplicacion de las indicaciones; sin que pueda haber en esto mas error que los que el primer observador haya cometido en la comparacion de las tintas producidas por el colorigrado, con las de los objetos que haya querido caracterizar; pero desgraciadamente, este es el límite inevitable de la exactitud en las evaluaciones que no pueden obtenerse sino por el testimonio de los sentidos.

Habia pensado añadir aqui algunos ejemplos de determinaciones de tintas generalmente conocidas; pero tan fáciles como son estas determinaciones cuando se tiene á la vista la tabla de Newton, y se está familiarizado con ella, tan largo y penoso sería quererlas esplicar sin el socorro de esta; y por lo mismo me limitaré á lo dicho ya sobre este objeto en el capítulo 7.° del 6.° libro. Solo añadiremos que se ha usado el colorigrado para determinar la serie de tintas producidas por el camaleon mineral, de que se ha hablado alli, y que Mr. Chevreul ha conseguido preparar de un modo constante; y Mr. Biot hizo reconocer y observar á Mr. Chevreul, la perfecta identidad de las tintas con las de la tabla de Newton á que se las habia comparado.

Mr. Arago ha construido antes que Mr. Biot un

cianómetro, en que se emplea tambien la luz polarizada, pero bajo otro principio. En su aparato una tinta fija de azul se mezcla con cantidades de blanco sucesivamente crecientes y conocidas, de donde resultan todas las tintas sucesivas de un azul cada vez mas pálido. Mr. Arago ha hecho tambien una ingeniosa aplicacion del mismo principio de la mezcla de las tintas, á la medida de la intensidad de la luz en diferentes puntos del disco del sol. Es de desear que publique el pormenor de sus curiosas observaciones.

CAPITULO VIII.

Sobre la difraccion de la luz.

La difraccion es una modificacion que sufren los rayos luminosos cuando pasan cerca de los estremos de los cuerpos, en cuyo caso se doblan y desvian de su camino recto, y diversamente segun su distinta refrangibilidad. Este fenómeno puede hacerse visible por medio de la esperiencia siguiente. Introdúzcase en un cuarto oscuro un rayo solar fijo, reflejado horizontalmente por un heliostato, y recíbase perpendicularmente en un carton blanco, vertical y separado de la ventana como cinco ó seis metros. Si el agujero por donde entra el rayo es circular, y tiene á lo menos un milímetro de diámetro, la imágen circular del sol proyectada sobre el carton no sufrirá ninguna alteracion sensible en su blancura. Pero si en el eje del rayo de luz, y á dos ó tres metros de distancia de la ventana, se coloca una lámina circular de metal agujereado en su centro con una aguja muy fina, de suerte que interceptando toda la luz que no pase por aquel agujerito, se recibe esta en el mismo carton blanco, ó mejor aun en un vidrio ligeramente esmerilado por una de sus caras, colocado á la misma distancia, y detrás del cual se coloque el ojo, no se verá ya una sola imágen circular de luz blanca. La mancha blan-

ca se hallará rodeada por varios anillos de colores concéntricos con ella, cuya estension total escederá en mucho á la que hubiera debido tener el hacecillo solar si los rayos que le componen hubieran seguido su direccion rectilínea; porque segun las disposiciones que acabamos de decir, estos rayos no formaban entre sí sino ángulos estremamente pequeños. Es preciso, pues, deducir de aqui, que al pasar por el agujerito han sufrido en él una modificacion que los ha dilatado en un cono mas abierto, ó mas bien en muchos conos, segun su distinta refrangibilidad. Y para probar que la inflexion se ha verificado en el mismo agujerito, ó á una distancia imperceptible de él, no hay mas que acercar poco á poco á él el vidrio esmerilado en que se pintan los anillos, y se les verá disminuir y concentrarse cada vez mas, como si los conos que los forman emanasen del agujerito. Despues de separarse de este á una distancia muy pequeña, los rayos han tomado toda la inflexion que deben tener, porque si se coloca el ojo cerca del agujerito y se mira por él, se verá la primera abertura rodeada de anillos semejantes de colores, que no son otra cosa que las imágenes trazadas en el ojo por los rayos que llegan á él. Además, si el agujerito está hecho de un modo un poco irregular de suerte que haya quedado alguna desigualdad en sus bordes, se verán brillar con mil colores las partecillas de metal por las diferentes difracciones que comunican á los rayos de luz.

Ahora bien, volvamos á colocar donde al principio el vidrio esmerilado de modo que los anillos sean bien visibles, y examinemos con atencion el órden de sus colores; veremos que en cada anillo el azul y el violado se halla á la parte interior; y el naranjado y rojo en la esterior, exactamente como en los anillos reflejos entre dos objetivos esféricos; de suerte, que las mismas moléculas luminosas, cuya reflexion en cada órden se verifi-

todos los estremos de los cuerpos, cualesquiera que sean las líneas rectas ó curvas que los terminen; y en efecto, siempre se forman al rededor de estas líneas, bandas luminosas, cuyos colores se hallan colocados del mismo modo que en los anillos producidos al atravesar un agujero circular.

Coloquemos, por ejemplo, á una pequeña distancia, y paralelamente uno á otro, los estremos rectilíneos de dos láminas de igual naturaleza, que estén biseladas; y para hacer variar mas minuciosamente la distancia de los dos bordes opuestos de estas láminas, fijemos una de ellas, y coloquemos la otra sobre un bastidor movible por medio de un movimiento de rosca que la haga acercar á la primera, como el hilo movible de un micrómetro se acerca gradualmente á los hilos fijos, y tendremos el aparato representado en la fig. 21, é inventado por S' Gravezaude. Sustituyámosle, pues, á las simples láminas ajugercadas que nos han servido al principio, y hagamos caer perpendicularmente entre los cortes de estas láminas, las partes mas centrales de un hacecillo luminoso compuesto. En tal caso, si se separan las láminas una de otra á una distancia bastante grande, por ejemplo, á diez ó doce milímetros, siendo siempre la misma que hemos supuesto al principio, la distancia al carton ó al vidrio esmerilado, no se observarán en el hacecillo transmitido marcas sensibles de coloracion, y solo formará una imágen blanca rectangular como lo es el intervalo de las dos láminas. Pero aproximando poco á poco una á otra, se verá guarnecerse los lados mayores por la parte de adentro de líneas blancas muy finas, mas luminosas que todo el resto; acercando aun mas láminas estas líneas se convertirán en bandas de colores separadas unas de otras, que se separarán á grandes distancias á uno y otro lado, dejando entre sí una imágen blanca rectangular, mas ancha y dilatada que anteriormente. Si se examinan los colores de estas bandas despues que

caba á mayores gruesos, son las que sufren aqui á igual distancia mayores separaciones.

Para examinar mas de cerca esta analogía, es necesario cortar, como ha hecho Newton, el rayo solar por medio de un prisma, y hacer caer sucesivamente sobre el agujerito los diversos colores simples, manteniendo siempre su incidencia perpendicular á la lámina en que está hecho el agujero. Entonces solo se obtienen anillos formados por el color de que se trata, y separados por intervalos absolutamente negros. Siguese de aqui, que no solo la inflexion separa cada especie de luz simple, sino que hay en esta separacion diferentes grados separados unos de otros, y no una progresion contínua; de suerte que cada especie de luz, separada por la influencia del agujerito, es conducida en parte al primer anillo de este color, parte al segundo &c., pero nunca á los intervalos que los separan. Esto es tambien análogo á las intermitencias periódicas que presenta la reflexion en las láminas, ya delgadas, ya gruesas; y del mismo modo se observa que los anillos difractos simples son mayores en el azul que en el violado, mayores en el verde que en azul, y asi sucesivamente hasta el rojo, que forma los mas grandes de todos.

Mas adelante indicaremos las relaciones del tamaño de estos anillos en los diferentes ordenes, y en los diversos colores, pero lo dicho ya basta para enseñarnos á variar el fenómeno. Porque asi como de los fenómenos capilares, la accion ejercida por la circunferencia interior de los tubos circulares se reproduce en las superficies interiores de todos los otros tubos, cualquiera que sea su forma, por la pequeñez de las distancias á que se hace sensible, del mismo modo la accion inflexora que se verifica en el perimetro de un agujero circular sobre las moléculas luminosas que pasan cerca de sus orillas, debe reproducirse siguiendo leyes semejantes, aunque acaso con distintas intensidades, en

están bien determinadas, se reconocerá en ellas exactamente el mismo órden que hemos observado en los anillos circulares, es decir, el violado en la parte interior, el rojo en la esterior, y los demas colores en las zonas intermedias de cada banda. Hecha esta observacion, si se continúan acercando las láminas, se verán introducirse sucesivamente las bandas en el sitio de la sombra, lo cual indica que las inflexiones que producen estas bandas aumentan, y este aumento continuará mientras sigan acercándose las láminas.

Esta descripcion supone que los bordes opuestos de las láminas se mantienen en un estado constante de paralelismo; mas cuando el bastidor que contiene la lámina movible no llena esta condicion, las bandas no son paralelas, sino que segun la direccion de los bordes que las producen, toman una forma trapezoidal, fig. 22, siendo mas anchas por la parte en que estan mas próximas las láminas y mas estrechas en los sitios en que se separan mas. Para poder producir como se quiera estos diferentes grados de inclinacion, se da á la lámina fija un movimiento de rotacion al rededor de uno de sus puntos C, fig. 23, por medio de una varilla metálica fija en su pie y que la atraviesa en este punto. Apretando sobre la cola M de la lámina, ó empujándola con un movimiento de rosca, se da á su borde la oblicuidad que se quiere, lo cual sirve tambien para establecer un paralelismo perfecto, porque conduciendo la lámina movible hasta el contacto, y siendo bastante libre el movimiento del eje C para que pueda girar fácilmente la lámina L′ los dos bordes se unirán necesariamente uno á otro en toda su estension, y fijando en esta posicion la lámina L′ y retirando L por su movimiento de rosca subsistirá el paralelismo, como podrá reconocerse por el de las bandas, que es un indicio muy sensible de aquel. Sin embargo, es preciso tener cuidado al poner en contacto los bordes de no apretarlos fuertemente

por el movimiento de la rosca, porque si estan adelgazados tanto como deben estarlo para que su corte sea bien rectilíneo, esta presion los desfiguraria, y por consiguiente produciría irregularidades en la configuracion de las bandas.

Si se vuelven á poner los bordes en el estado de paralelismo, y se coloca á una gran distancia el vidrio esmerilado, en comparacion á la que tienen entre sí, de suerte que no aumente el número de bandas aunque se separe mas, se encuentra este notable resultado, que han comprobado Mr. Pouillet, y Mr. Biot, por medio de un gran número de esperiencias: *la separacion que sufre cada especie de moléculas luminosas en cualesquiera medios, bajo la incidencia perpendicular y con una separacion dada de las láminas, se determinan por las longitudes de los accesos de las moléculas luminosas en estos medios, y son proporcionales á ellas*; de donde se sigue que varían de un medio á otro como los mismos accesos, es decir, en razon inversa de las relaciones de refraccion. Las figs. 24 y 25 representan las proporciones y distribucion de las bandas paralelas de diferente color, construidas conforme á la ley anterior.

Falta ahora esplicar cómo se dobla la luz entre los biseles para ir á formar las bandas, y para esto no hay medio mas seguro que seguir gráficamente la marcha de cada rayo. Asi han tratado de hacerlo MMr. Pouillet y Biot, y obtuvieron la marcha de los hacecillos que representa la fig. 26.

Esta construccion geométrica de los resultados de la esperiencia nos hace, pues, conocer que toda la luz que pasa entre los bordes de las láminas, se divide en dos mitades, que se separan en sentido contrario, y cada una hácia el borde mas distante. Resulta de aqui que los hacecillos que se separan de uno de los biseles encuentran y penetran á los hacecillos que vienen del otro bisel; y esta penetracion produce las alternativas de bandas luminosas y ne-

gras que se observan en el rectángulo de luz terminado por los bordes de las láminas, cuando se recibe la luz transmitida á diferentes distancias en un vidrio esmerilado.

Separando progresivamente uno de otro los biseles por entre quienes pasa la luz, se estrechan cada vez mas las bandas hasta cierto límite, desde el cual permanecen constantes aun cuando se quite enteramente uno de los biseles. Esto prueba que un solo bisel puede hacer formar bandas á la luz que pasa muy inmediata á él, de donde deberemos inferir que podrán producir el mismo efecto todos los estremos de los cuerpos que limitan el medio por donde se transmite la luz. Asi introduciendo un rayo de luz simple en un cuarto oscuro, y recibiéndole á grandes distancias en un vidrio esmerilado se ve que los estremos de todos los cuerpos junto á los cuales pasa este rayo, estan rodeados de bandas de luz semejantes á las que producirian dos biseles muy separados, presentados perpendicularmente al rayo de luz. Esta última condicion es necesaria para enunciar el fenómeno con exactitud, porque pueden observarse bandas muy anchas entre dos biseles separados si se inclinan mucho á la luz incidente, asi como se forman tambien por reflexion bandas semejantes, cuando el rayo incidente pasa rasando los bordes de las superficies con una gran oblicuidad.

Pero si el cuerpo único que forma las bandas tiene dimensiones muy pequeñas; si, por ejemplo, es una lámina opaca de menos de cinco milímetros de ancho ó mas ancha, pero mas delgada é inclinada al hacecillo incidente; de modo que no intercepte sino un ancho muy pequeño, entonces la inmediacion de sus bordes produce nuevos fenómenos, ademas de las bandas esteriores formadas á una y otra parte hácia la luz, como si el cuerpo fuese indefinido se forman otras bandas dentro de la sombra. Cuando la luz incidente es simple, estas bandas son del mismo color que ella y sepa-

radas unas de otras por intervalos absolutamente negros, y su número es siempre impar, de suerte que hay siempre una en el centro de la sombra. Recibiéndolas primero á distancias muy pequeñas y gradualmente mayores, aparecen al principio muy finas y casi imperceptibles, y poco á poco se estienden, se hacen mas visibles, y los intervalos se dilatan al mismo tiempo que ellas. Pero lo que es muy importante observar es que á cualquiera distancia que se miren no se ven en ellas las coincidencias y sobreposiciones sucesivas de brillo y oscuridad que se notan en las bandas producidas entre dos biseles á medida que se penetran recíprocamente. Esto pueba que las bandas formadas interiormente en la sombra de una lámina estrecha ó no se cortan ó se cortan detras de la lámina, á una distancia insensible de su segunda superficie, desde donde van separándose del eje á una y otra parte, aun mas rápidamente que las bandas esteriores; pues muy pronto se reunen con ellas, las cortan y las pasan. Estas bandas, descubiertas por Guinaldi, y observadas despues por el doctor Young y por Mr. Flaugergues, acaban de estudiarlas muy detalladamente; Mr. Fresuel, ingeniero de caminos y canales, quien habiendo medido las separaciones de las diversas bandas por nuevos medios de una grande exactitud, ha hallado el medio de unirlas numéricamente, con las que produce un bisel sencillo, y ademas ha reconocido relaciones íntimas entre ellas y el tamaño de los accesos. Estos resultados se hallan notablemente de acuerdo con las ideas que Mr. Tomás Young habia enunciado sobre esta especie de fenómenos en las *transacciones filosóficas* hacia ya mucho tiempo, segun las inducciones sacadas del movimiento ondulatorio.

Cuando una lámina estrecha y opaca forma asi bandas interiores en su sombra, se las puede hacer desaparecer, colocando una pantalla opaca en contacto con *un solo borde* de la lámina, ó introdu-

ciendo esta pantalla á cierta profundidad en el hacecillo de rayos, ya antes de la lámina opaca ya despues de ella. Este fenómeno ha sido descubierto por Mr. Young. Mr. Arago ha añadido la particularidad de que la desaparicion puede verificarse igualmente por la aproximacion de una pantalla opaca, suficientemente gruesa, y que es progresiva segun el grueso; de suerte que las pantallas delgadas no hacen al principio otra cosa que hacer pasar las bandas al lado á que se hallan. Es digno de notar que la cantidad de esta trasposicion puede calcularse por consideraciones sacadas del movimiento ondulatorio, cuando se conoce el grueso de la lámina interpuesta y su refraccion. Si se colocan dos pantallas á los dos lados de la lámina opaca, el efecto es igual á la diferencia de las trasposiciones que cada una de ellas hubiera producido separadamente. Los señores Arago y Fresuel han empleado este método para medir la refraccion de las sustancias gasosas, con una exactitud á que no llega ningun otro medio. (Véanse los *anales de química y de física*, de los años 1816 y 1817.)

CAPITULO IX.

Medida de las intensidades de la luz.

Sucede con frecuencia que en las investigaciones de óptica hay que comparar las intensidades de dos luces visibles á un mismo tiempo ó sucesivamente. En el primer caso, que es el mas sencillo, se iluminará aisladamente con cada una de las dos luces, dos discos iguales de un papel muy blanco ó de cualquiera otro cuerpo mate que refleje bien, y mirando á ambos al mismo tiempo se separará la luz mas fuerte hasta que uno y otro parezcan igualmente iluminados. Entonces las intensidades serán entre sí, como los cuadrados de las distancias de las luces á los discos. Esta ilumina-

cion parcial puede conseguirse iluminando con las dos luces un espacio blanco é interponiendo delante un disco opaco pequeño, cuyas sombras indiquen los puntos iluminados aisladamente. Basta, pues, hacer igualmente intensas estas sombras, variando las distancias de los cuerpos luminosos al espacio blanco. Se puede tambien recibir las dos luces separadamente por dos tubos cónicos reunidos por sus cúspides, y terminados en este sitio por dos discos iguales de papel blanco. Entonces mirando á un mismo tiempo á ambos discos, con la cabeza envuelta para no recibir ninguna otra luz, se indica á otro observador el objeto luminoso que debe separarse ó acercarse, hasta que aparezcan iguales las intensidades de ambos discos. Cuando se ha conseguido esta igualdad, las fuerzas de las dos luces son proporcionales á los cuadrados de sus distancias al disco correspondiente. Si se trata de comparar dos luces que no puedan verse á un mismo tiempo, no hay mas que elegir otra 3.ª de tal naturaleza que se mantenga sin ninguna variacion, y compararla sucesivamente con cada una de las otras. Por medio de estos métodos y otros de la misma especie, Bouguer ha obtenido un gran número de resultados curiosos, que ha publicado en una obra separada, de la que vamos á estraer algunas de las aplicaciones mas usuales.

Tabla de las cantidades de luz que refleja el agua bajo diferentes oblicuidades.

1000 espresa el número de rayos incidentes.							
Oblicuidad contada desde la superficie.	Número de rayos reflejos.	Oblicuidad contada desde la superficie.	Número de rayos reflejos.	Oblicuidad contada desde la superficie.	Número de rayos reflejos.	Oblicuidad contada desde la superficie.	Número de rayos reflejos.
0° 30′	721	5° 0	501	17° 30	178	50°	22
1	692	7 30	409	20	145	60	19
1 30	669	10	333	25	97	70	18
2	639	12 30	271	30	65	80	18
2 30	614	15	211	40	34	90	18

Tabla de las cantidades de luz que refleja la primera superficie del vidrio que sirve para hacer espejos.

1000 espresa el número de rayos incidentes.					
Oblicuidad de incidencia contada desde la superficie.	Número de rayos reflejos.	Oblicuidad de incidencia contada desde la superficie.	Número de rayos reflejos.	Oblicuidad de incidencia contada desde la superficie.	Número de rayos reflejos.
2° 30	584	15°	299	50°	34
5	543	20	222	60	27
7 30	474	25	157	70	25
10	412	30	112	80	25
12 30	356	40	57	90	25

Tabla de las cantidades de luz que refleja el marmol negro pulimentado.

1000 espresa el número de rayos incidentes.	
Angulo de los rayos incidentes con la superficie del marmol.	Número de rayos reflejos.
3° 35′	600
15	156
30	51
80	23

La primera reflexion bajo el ángulo de $3^{\circ}\ 35'$ era casi tan viva sobre el marmol, como sobre el mercurio y lo mismo sucede con todos los cuerpos planos, sean los que quieran. Todos son muy buenos reflectores cuando los rayos incidentes forman ángulos muy pequeños con su superficie, pero su fuerza reflejante se debilita rápidamente al paso que la incidencia de los rayos se acerca á la perpendicular. En esto se diferencian de los cuerpos cuya fuerza reflejante es enérgica, pues en estos la intensidad de la luz refleja, no sufre sino variaciones muy débiles bajo diversas incidencias. En el mercurio, por ejemplo, y en los espejos de telescopio, la estension total de esta variacion, apenas llega á $\frac{1}{8}$ ó $\frac{1}{9}$ desde o hasta 90° de incidencia, y á la de 21° contados desde la superficie, el mercurio refleja unos 637 rayos de cada 1000. Asi la reflexion en su superficie, bajo todos los demas ángulos, puede subir hasta unos 700 rayos y bajar hasta 600. Este metal, que acaso es el cuerpo que mejor refleja, absorve, pues, en su sustancia mas de la cuarta parte de la luz que le hiere; y esta absorcion es aun mucho mayor en los cuerpos que no reflejan tambien como él.

Mr. Arago ha hecho servir las propiedades de la polarizacion movible á la medida comparativa de las intensidades de la luz, pero aun no ha publicado el pormenor de sus operaciones. Sin embargo, ha tenido la bondad de asegurarnos que los resultados de Bouguer que hemos puesto antes, le han parecido exactos.

LIBRO OCTAVO.

DEL CALÓRICO, YA RADIANTE YA LATENTE.

CAPITULO PRIMERO.

De las relaciones de la luz y el calórico.

Hasta aqui solo hemos estudiado en la luz las propiedades que notamos en ella por medio de la vista, y este solo género de examen nos ha hecho descubrir un gran número de caractéres físicos que poseen las moléculas luminosas. Ahora vamos á estudiar por medio de otras pruebas la facultad que posee la luz de calentar los cuerpos espuestos á su accion; y trataremos de decidir si este fenómeno proviene de la identidad de la luz y el calórico, ó simplemente de la coexistencia de ambos principios en los rayos luminosos.

He aqui un hecho capital en este punto descubierto por Mr. Herschel. Habiéndose propuesto este sabio célebre medir la energía calorífica de los diferentes rayos del espectro solar, colocó diversos termómetros muy sensibles en cada una de las siete divisiones de colores trazadas por Newton (1), y observó á qué grado llegaba cada termómetro sobre el punto á que se hallaba en el aire

(1) La primera idea de esta esperiencia se debe á Mr Rochon, que la ha publicado en sus opúsculos, impresos en 1783; pero probablemente eran inexactos los termómetros de que hizo uso, ó muy poco sensibles para presentar con exactitud diferencias tan pequeñas, pues halló el maximum de calor en el amarillo; cuando en realidad se halla en el rojo, y no descubrió ninguna señal de calor sensible mas allá de la parte visible del espectro.

que las rodeaba. De este modo halló que se elevaba mas el que estaba puesto en el azul que el del violado, mas el del verde que el del azul, y asi sucesivamente hasta el del rojo, que producia una temperatura mas elevada que los otros colores. Pero lo que era muy digno de observar, no era aun en los rayos rojos donde existia el maximum de temperatura, sino un poco mas allá del rojo estremo fuera de toda la parte visible del espectro. De aqui dedujo Mr. Herschel que la propiedad calorífica no era inherente solo á los rayos que producen en nosotros la sensacion de la luz, sino que entre estos habia otros menos refrangibles que ellos, que solo gozaban de la facultad de calentar.

Estas delicadas esperiencias fueron repetidas por los fisicos, aunque con resultados diferentes. Unos descubrieron como Mr. Herschel marcas sensibles de calor mas allá de la parte visible del espectro, y los otros no reconocieron en tal sitio sino efectos nulos ó demasiado débiles para poderlos apreciar bien. Con este motivo, tres de ellos, los Sres. Wollaston, Ritter, y Beckman se dedicaron á estudiar detenidamente el estremo opuesto del espectro, esto es, el que da la sensacion del violado; y hallaron que este estremo, cuya facultad calorífica era insensible, gozaba de otras propiedades particulares, que pueden llamarse químicas, pues determinan por su influencia combinaciones que no determina el estremo rojo del espectro; y asi como en este último el maximum de calor se observa un poco mas allá del rojo estremo, asi á la otra parte el maximum de la accion química se manifestaba un poco mas allá de los límites sensibles del último violado. De aqui infirieron los fisicos que la luz solar era una mezcla de tres especies de rayos, que pueden llamarse coloríficos, caloríficos y químicos, segun los efectos particulares que producen.

Pronto examinaremos hasta qué punto es exac-

ta ó verosimil esta conclusion; pero antes debo advertir que los hechos de que acabo de hablar han sido recientemente comprobados con el mayor esmero, y puestos fuera de toda duda por Mr. Berard. Este físico conoció la necesidad de prolongar la duracion de las esperiencias para hacerlas mas seguras y mas sensibles sus efectos; y por lo mismo se valió de un rayo solar reflejado por un heliostato, que quebrantado por medio de un prisma le produjo un espectro muy estendido y perfectamente fijo. Para determinar las propiedades caloríficas, colocó termómetros muy sensibles en los siete espacios ocupados por los diferentes colores, y para determinar las propiedades químicas, colocó en estos mismos espacios, ya libremente, ya encerrados en redomas muy claras, varias combinaciones químicas, fáciles de alterar.

Procediendo de este modo ha obtenido Mr. Berard los mismos resultados que Mr. Herschel respecto al aumento de la facultad calorífica, desde el violado hasta el rojo; pero ha hallado el maximum de calor en el estremo mismo del espectro, y no fuera de él. Le fija, pues, en el punto en que la bola de su termómetro se hallaba aun enteramente cubierta por los últimos rayos rojos; y decrece la temperatura progresivamente, al paso que la bola de termómetro entra en la obscuridad. En fin, colocando el termómetro enteramente fuera del espectro visible, que es donde Mr. Herschel fija maximum de calor, la elevacion de temperatura sobre la del aire contiguo, solo ha sido $\frac{1}{5}$ de lo que era en los rayos rojos estremos. La intensidad absoluta del calor producido ha sido tambien menor en las esperiencias de Mr. Berard, que en las de Mr. Herschel. Estas diferencias ¿provienen de la materia de los prismas y de la diversidad de los aparatos, ó de alguna otra circunstancia fisica inherente al mismo fenómeno? He aqui una cuestion que nos es imposible decidir.

Mr. Berard ha querido ver si estas propieda-

dés se verificaban separadamente en cada uno de los hacecillos en que se divide la luz cuando atraviesa un cuerpo que produce la doble refraccion; y para ello ha hecho pasar el rayo solar por un prisma de espato de Islandia. La division del rayo ha formado dos espectros que han presentado unas mismas propiedades; en ambos iba aumentando la facultad calorífica desde el violado al rojo estremo, y subsistia aun mas allá de los últimos rayos rojos sensibles. Asi cuando el rayo se divide al atravesar el cristal, la facultad calorífica se divide tambien entre los dos hacecillos luminosos.

En esta operacion, en que las moléculas luminosas son polarizadas por el cristal, ¿sufren acaso un efecto semejante las moléculas *caloríficas obscuras?* Para saberlo Mr. Berard ha recibido el rayo solar en un vidrio pulimentado y transparente, que formaba con él un ángulo de 35° 25′, á fin de que la parte refleja se hallase completamente polarizada. Ha recibido en seguida otra vez este rayo reflejo en otro vidrio que formaba con él el mismo ángulo de 35° 25′, y dispuesto de modo que pudiese girar cónicamente bajo esta incidencia constante; que es precisamente el aparato de dos vidrios de Malus que hemos empleado tantas veces. Sabemos que haciendo girar el segundo vidrio, se hallan dos posiciones en que no refleja la luz; solo falta, pues, examinar si en ellas refleja el calor. Para esto Mr. Berard dispuso un espejo metálico cóncavo de modo que recogiese los rayos reflejos por este vidrio, y los concentrase sobre un termómetro que colocó en su foco. Mas á fin de poder seguir fácilmente los diferentes periódos del fenómeno, unió de un modo fijo el termómetro al espejo, y el espejo al vidrio, de modo que cuando giraba este las otras dos piezas giraban tambien, conservando, respecto á ella, siempre la misma posicion. Dispuestas asi las cosas, colocó sucesivamente el segundo vidrio en todas las posiciones posibles al rededor del rayo, y

halló que en las que no reflejaba la luz, tampoco reflejaba el calor, pues nada subia el termómetro colocado en el foco del espejo; en vez de que subia una cantidad muy sensible cuando el vidrio se hallaba en algun azimut de aquellos en que puede verificarse la reflexion de la luz. Asi, tanto en esta esperiencia como en la anterior por medio del prisma de espato de Islandia, el principio calorífico obscuro acompaña siempre á las moléculas luminosas, y se presta á las mismas acciones que ellas.

Sin embargo, es preciso convenir en que este principio se halla aqui muy poco separado de la luz, puesto que no está libre sino en un espacio muy pequeño mas allá del estremo rojo del espectro, pero hay una infinidad de circunstancias en que se obtiene gran abundancia y casi aisladamente; á saber, cuando observamos cuerpos muy calientes sin ninguna apariencia sensible de luz. Tal es, por ejemplo, el estado de una bola de hierro caliente, pero sin llegar á enrojecerse, ó aun mejor de un matraz de estaud ó de vidrio lleno de agua hirviendo. El calor que estos cuerpos escitan á cierta distancia en nuestros órganos ó en el termómetro no puede generalmente atribuirse á una transmision por contacto, por medio de las moléculas de aire ó de vapores que nos separan de ellos, pues la impresion calorífica se deja sentir muy bien en la direccion horizontal, y aun de abajo arriba, lo cual es enteramente contrario á la direccion del movimiento que toman las moléculas de aire, de vapores, ó de cualquieta otro fluido al paso que se calientan, forzándolas la dilatacion que sufren á subir á la parte mas alta, como demuestra el raciocinio, y hemos probado por la esperiencia. Debemos, pues, inferir necesariamente que en estas circunstancias y todas las análogas se verifica una transmision inmediata de calórico obscuro: bien sea que este calórico tenga una existencia material y se estienda al modo de la luz, ó bien consista

únicamente en las vibraciones propagadas en un medio imponderable; cuyos dos modos dan poco mas ó menos los mismos efectos, si este medio es perfectamente elástico. Substituyendo de esta manera cuerpos calientes y obscuros al espectro de que se habia valido al principio, halló Mr. Berard que los efectos producidos en el termómetro seguian leyes semejantes; mas antes de que nosotros saquemos ninguna consecuencia de esta esperiencia, es preciso que espongamos las leyes con que se refleja el calórico.

Si se coloca uno de los cuerpos calientes y obscuros, de que acabamos de hablar, delante de un espejo cóncavo de metal, se halla que produce por reflexion un foco de calor, y este foco se forma exactamente en el mismo punto que si el cuerpo fuese luminoso. Esto nos manifiesta que la emanacion calorífica se refleja como la luz, haciendo el ángulo de reflexion igual al ángulo de incidencia; y asi como la reflexion regular de la luz es nula, ó casi nula en los cuerpos ásperos, á no ser que caiga muy oblicuamente sobre su superficie, del mismo modo hay unas superficies que reflejan mejor que otras el calórico obscuro. Se refleja muy bien, por ejemplo, en la superficie de los metales pulimentados, y no tan bien ni con mucho sobre la superficie del vidrio, por mas pulimento que se haya dado. Esta es la razon porque Mr. Berard ha empleado un espejo metálico en la esperiencia de reflexion de que hemos hablado antes. Aqui solo indicamos estas modificaciones que mas adelante examinaremos por menor.

El mejor medio de hacer sensible la reflexion del calórico es colocar uno enfrente de otro, á cierta distancia, y sobre el mismo eje, dos espejos metálicos cóncavos, mirándose, fig. 1. En el foco principal del primero A, se coloca un cuerpo caliente y obscuro, por ejemplo un matraz M, lleno de agua hirviendo. Los rayos caloríficos que emanan

de él, y caen sobre el espejo A, se reflejan como si fuesen rayos de luz, paralelamente al eje, y se propagan hasta el espejo B, que los concentra de nuevo en su foco principal. Asi, colocando en este punto un termómetro sensible, sube por su influencia, tanto mas cuanto mayor calor produce el cuerpo colocado en el foco A: y á fin de que la esperiencia sea concluyente, es necesario separar bastante los dos espejos, para que el matraz M no influya directamente de un modo sensible en el termómetro colocado en el foco del espejo B. Esto se puede comprobar repitiendo la esperiencia á la misma distancia sin los espejos, ó cubriendo una parte ó toda la superficie de uno de ellos; porque si los espejos estan bien construidos y colocados exactamente, la elevacion del termómetro será sensiblemente proporcional á la parte de superficie que queda descubierta. Cuando el aparato se halla completamente preparado, se puede interceptar súbitamente la transmision del calórico, por la interposicion de una pantalla, y permitirle el paso de repente quitándola. De este modo se ha observado que la tal transmision es escesivamente rápida; pues si se emplea un termómetro de aire bien sensible, se ve aparecer el efecto termométrico en el momento que se quita la pantalla, cualquiera que sea la distancia que haya entre ambos espejos. Esta esperiencia y la disposicion de los dos espejos aparecidos se debe á los Sres. de Saussure y Pictet de Ginebra; pero la primera observacion sobre la reflexion del calórico es de Mariotte, quien indicó asimismo la necesidad de distinguir el calórico obscuro del calórico luminoso. (*Tratado de los colores*, pag. 288, 1717).

Esta es la ocasion de descubrir dos instrumentos termométricos muy ingeniosos y muy propios para esta especie de investigaciones. Para conocer su utilidad, basta considerar que el empleo del termómetro sencillo, por sensible que sea, se halla aqui sujeto siempre á alguna incertidumbre, pues cuando

se le ve subir una cantidad acaso muy pequeña. no es posible estar absolutamente seguro de que su movimiento es únicamente producido por la causa calorífica que se observa y no por un cambio pequeño de temperatura, en el medio que le rodea. Se ve, pues, que esta incertidumbre dejaria de existir si se tuviese un instrumento, sobre el cual obrase únicamente la influencia del calórico reflejo, ó mas bien el esceso de su influencia sobre la del aire inmediato. Tal es la ventaja del termómetro diferencia de Mr. Leslie, y del termoscopo de Rumford.

El primero de estos instrumentos es el que presenta la fig. 2. Para formarle se toman dos tubos de vidrio de diferentes longitudes, terminados uno y otro en una bola hueca, y cuyo calibre ba aumentando un poco hácia el estremo opuesto, y se introduce en la bola del tubo mas largo una corta cantidad de ácido sulfúrico teñido con carmin. Se unen despues ambos tubos á la lámpara, y se les encorba de modo que tomen la figura de la letra U. Ahora bien, si los dos brazos del instrumento situados á una parte y otra de la bola líquida, se hallan espuestos á la misma temperatura, estando igualmente caliente en el aire contenido en cada uno de ellos, hará un mismo esfuerzo sobre la bola, y por consiguiente no le hará mover; pero si uno de los brazos se calienta mas que el otro, el aire que contiene se hará mas elástico, y arrojará la bola hácia el lado opuesto. El instrumento será, pues, sensible únicamente á las diferencias de temperatura en que se hallen sus dos bolas, que es lo que le da el nombre de termómetro diferencial.

El termóscopo de Rumford, fig. 3, no es otra cosa que el termómetro diferencial de Mr. Leslie, cuya vara está horizontal y las dos bolas á mayor distancia. Esta disposicion da mayor facilidad para obrar separadamente sobre cada una de ellas, separándolas con pantallas de carton cubiertas con papel dorado.

La sensibilidad de este instrumento depende del grueso de las bolas, de la pequeñez del tubo, y de la finura del vidrio; y puede ser tal, que el calor solo de la mano desnuda, presentada á dos ó tres metros de distancia de una de las dos bolas, baste para hacer marchar el líquido hácia el otro estremo, una cantidad bastante notable. Si, por el contrario, se la presenta un cuerpo mas frio que ella, el líquido se acerca á este lado, como debe hacer preveer la analogía de las disposiciones, aunque á primera vista sea un poco mas dificil conocer la razon.

Mas adelante examinaremos las consecuencias que resultan de esta influencia inversa, limitándonos ahora á considerarla como un hecho que comprueba la estrema sensibilidad del termóscopo, y que manifiesta la especie particular de investigaciones á que debe destinarse.

Teniendo, pues, un medio de producir aisladamente la irradiacion calorífica, usando de cuerpos calientes, pero obscuros; y poseyendo instrumentos bastante sensibles para manifestar hasta sus menores efectos, podemos volver á emprender con mucha ventaja la esperiencia hecha antes con el espectro para estudiar la polarizacion del calórico obscuro. Asi lo ha hecho Mr. Berard. Ha hecho reflejar en el primer vidrio del aparato de Malus, no ya un rayo solar, sino las emanaciones caloríficas de un cuerpo muy caliente, y apénas rojo ó enteramente obscuro. Estas emanaciones se han polarizado como la luz, pues el segundo vidrio ha reflejado el calor en las posiciones en que hubiera sido posible la reflexion de la luz, y ha dejado de reflejarle en aquellas en que la reflexion luminosa no se hubiera verificado. Asi, suponiendo que las emanaciones caloríficas obscuras sean producidas como la luz, por moléculas materiales movidas con una gran velocidad, se ve que estas moléculas se modificarán por la reflexion del mismo modo que la luz; y por consiguiente se

la podrá aplicar todas las consideraciones geométricas y físicas que hemos establecido respecto á las moléculas luminosas, conforme á los fenómenos de la polarizacion.

Esta analogía, ya muy íntima, se halla apoyada por otra muy digna de atencion, descubierta por De Laroche, observador hábil, y de quien ha privado á las ciencias, de quien hubiera sido apoyo, una muerte prematura. Hacia mucho que los físicos habian observado que el vidrio transmite muy imperfectamente las emanaciones caloríficas obscuras, y aun las intercepta totalmente, mientras que transmite en abundancia los rayos luminosos, sobre todo los del sol con las propiedades caloríficas que los acompañan. De Laroche trató de determinar la causa de esta diferencia; y por una serie numerosa de esperiencias, que presentaremos luego, ha hallado que mientras el manantial de calor tiene una temperatura inferior á la del agua hirviendo, los rayos caloríficos que emanan de él se transmiten muy poco ó nada al través de una lámina de vidrio, por delgada que sea; pero que pasado este término empiezan á transmitirse sensiblemente, y en proporcion tanto mayor, cuanto mas elevada es la temperatura del manantial; hasta que al fin, cuando este se acerca al estado luminoso, la transmision se hace aun mas abundante y mas fácil. Pero aun en este mismo estado hay tambien diferencias; pues segun la observacion de Mariotte, si se hace reflejar la luz del sol al foco de un espejo cóncavo de metal, y en seguida se pone delante de este espejo una pantalla de vidrio, solo resultará en la temperatura del foco una corta disminucion, como de $\frac{1}{7}$ ó $\frac{1}{8}$; pero si se hace la misma esperiencia con el fuego de un fogon ó de un horno, se verá que la reflexion directa sobre el espejo sin pantalla producirá un calor muy vivo, al paso que le producirá muy débil y casi insensible interponiendo la lámina de vidrio, aun cuando se acerque lo bastante al fuego para

que la imágen luminosa formada en el foco sea mas viva que antes. Este resultado, que no hacemos mas que enunciar, es de la mayor importancia; porque la diferencia de la transmision á diversas temperaturas del manantial manifiesta que las emanaciones caloríficas que salen de él se hallan diversamente modificadas segun las circunstancias; y ademas la mayor abundancia de la transmision, al paso que el manantial del calor se acerca al estado luminoso, parece que indica el progreso de un mismo fenómeno, que segun sus diferentes modificaciones, obra sobre nosotros de distinto modo, como si las emanaciones caloríficas no fuesen otra cosa que luz obscura, ó la luz calórico luminoso.

Pronto volveremos á tratar de esta conformidad; pero antes será útil completar el estudio de las propiedades particulares que presentan las diferentes partes del espectro solar. Hasta aqui no hemos considerado mas que sus propiedades coloríficas y caloríficas: tratemos ahora de la accion química, punto que ha sido tambien perfectamente discutido por Mr. Berard. Los químicos habian hallado hacia mucho tiempo que esponiendo el muriate de plata y algunas otras sales blancas á la luz, se ennegrecian en poco tiempo. La goma guayaca, espuesta de este modo á la luz, pasa del amarillo al verde, como ha observado Mr. Wollaston. En fin, los señores Gay Lussac y Thenard han presentado una accion de esta especie aun mas pronta y enérgica; porque esponiendo á un rayo de luz solar una mezcla de partes iguales en volúmen de gas hidrógeno y de cloro, se verifica al momento una detonacion que da por producto el ácido hidroclórico, llamado anteriormente ácido muriático. Estos diversos fenómenos han servido á Mr. Berard como de reactivos para estudiar y poner en claro las facultades químicas de los diferentes rayos del espectro; pues colocando en los espacios ocupados por los diferentes colores pedacitos de carton impregnados de

muriate de plata ó frasquitos llenos de la mezcla de los dos gases, ha podido juzgar de la energía de la causa por la intensidad y rapidez de las alteraciones químicas que sufrian las sustancias espuestas de este modo á los rayos solares. Asi ha reconocido que en efecto las propiedades químicas son mas intensas hácia el estremo violado del espectro, y que aun se estendian, como habian anunciado los señores Ritter y Wollaston, un poco mas allá de este estremo. Pero ademas, dejando estas sustancias espuestas por algun tiempo á la accion de cada rayo, como podia hacerlo por la inmobilidad de su espectro, llegó á observar efectos sensibles, aunque de una intensidad contínuamente decreciente, en los rayos azules, claros y obscuros; de donde se debe inferir que si hubiera podido emplear reactivos mas sensibles hubiera observado efectos análogos, aunque mas débiles, en los demas rayos. Para manifestar de un modo evidente la gran diferencia que hay en este punto entre las energías de los diversos rayos, ha concentrado Mr. Berard por medio de una lente toda la parte del espectro, que se estiende desde el verde hasta el violado estremo; y por medio de otra, toda la parte que se estiende desde el verde hasta mas allá del rojo. Este último hacecillo se reunia en un punto sensiblemente blanco, cuyo brillo casi ofendia á la vista, y sin embargo, el muriate de plata ha permanecido por mas de dos horas espuesto á esta viva luz, sin sufrir ninguna alteracion sensible. Por el contrario, esponiéndole al otro hacecillo, cuya luz era mucho menos viva y el calor mucho mas débil, se ha ennegrecido en menos de 10 minutos. Mr. Berard dedujo de esta esperiencia que los efectos químicos producidos por la luz no provienen únicamente del calor que desenvuelve en los cuerpos combinándolos con su suttancia; porque en esta suposicion, la facultad de producir combinaciones químicas parece que deberia ser mas intensa en los rayos en que es mayor la facultad de

complicacion de ideas, limitémonos á suponer con arreglo á los fenómenos que la luz solar se compone de un conjunto de rayos de diferente refrangibilidad, y por consiguiente diversamente susceptibles de ser modificados por los cuerpos, lo cual supone diferencias originales en sus masas y sus velocidades ó en sus afinidades. ¿Por qué estos rayos, que se diferencian en tantas cosas, habian de producir en los termómetros y en nuestros órganos las mismas sensaciones de calor y de luz? ¿Por qué habian de tener las mismas energías para formar ó descomponer las combinaciones? ¿No es muy natural que la vision no pueda verificarse en nuestros ojos sino entre ciertos límites de refrangibilidad, y que siendo esta demasiado grande ó pequeña, hiciese los rayos igualmente inútiles para producir aquel efecto? Tal vez estos mismos rayos serán visibles para otros ojos que los nuestros; acaso lo son respecto á algunos animales; y entonces desaparece lo maravilloso de su accion, ó mas bien entra en el modo general de accion propio de la luz. En una palabra, se puede suponer que la facultad calorífica y química varía en toda la estension del espectro, al mismo tiempo que la refrangibilidad, pero en proporciones diferentes; de modo que la facultad calorífica está en su *minimum* en el estremo violado del espectro, y en su *maximum* en el estremo rojo; y por el contrario, la facultad química tiene su *minimum* en el estremo rojo, y su *maximum* en el violado, ó tal vez un poco mas allá. Esta sola suposicion, que no es otra cosa que la espresion mas simple de los fenómenos, satisface perfectamente á todos los que hemos esplicado en este capítulo, y aun presenta medios de preveer la mayor parte por solas las analogías. En efecto, si todos los rayos que producen la vision, el calor y las combinaciones químicas pertenecen todos á la luz, es preciso que todos se reflejen sobre los cuerpos pulimentados, y que se reflejen siguiendo la misma

calentar. Pero tal vez se hallará menos oposicion entre estos dos modos de ver si se atiende á que, segun las esperiencias de De Laroche, pueden existir diferencias esenciales entre el calórico obscuro, empleado por los químicos para alterar ciertas combinaciones, y particularmente los colores vegetales y el calórico del espectro en la parte que no produce estos efectos. La dificultad cesaria, por ejemplo, si el calórico obscuro, obtenido por un calor artificial, fuese en todo ó en parte análogo á las emanaciones igualmente obscuras que se producen hácia el estremo violado del espectro; conformidad que nada ofrece que deba parecernos imposible.

Estas esperiencias de Mr. Berard acaban de probar que las diversas partes de un rayo solar disperso por el prisma poseen muy diferentes energías para producir la vision, el calor y las combinaciones químicas. Ahora bien, ¿atribuiremos estas tres facultades á tres especies distintas de rayos que existan independientemente unas de otras, y cada una de las cuales pueda producir un solo efecto? Siendo esto asi, aun será necesario que cada una de estas especies sea separable por el prisma en una infinidad de modificaciones como la misma luz, puesto que se halla por esperiencia que cada facultad química, iluminante y calorífica está repartida, aunque en diferentes proporciones, en cierta estension del espectro. Asi, en esta hipótesis deberemos suponer que existen en realidad tres espectros sobrepuestos unos á otros, á saber, un espectro calorífico, otro químico y otro luminoso. Tambien será preciso admitir que cada una de las sustancias que componen los espectros, y aun cada una de las moléculas de diferente refrangibilidad que componen estas sustancias, estan dotadas, como las moléculas de la luz visible, de la propiedad de polarizarse por la reflexion, sustrayéndose despues á la fuerza reflejante en los mismos casos que las moléculas luminosas, y asi de todo lo demas. En vez de esta

ley, esto es, formando el ángulo de reflexion igual al ángulo de incidencia; de donde resulta que se concentrarán ó dispersarán del mismo modo por espejos cóncavos ó convexos. Será tambien necesario que se polaricen todos al atravesar un cristal de doble refraccion, ó al reflejarse en un vidrio con una incidencia determinada, y aun cuando hayan recibido estas modificaciones podrán reflejarse en otro vidrio, dispuesto de modo que sea eficaz su fuerza reflejante sobre las moléculas luminosas; pero si esta fuerza no produce efecto ninguno sobre las moléculas de luz visibles, tampoco la luz invisible se reflejará, puesto que la causa que parece causa, que hace que la reflexion sea posible ó no, se verifica igualmente sobre todas las moléculas, cualquiera que sea su refrangibilidad, y por lo mismo deben tambien verificarse sobre las moléculas de luz invisibles, pues la condicion de invisibilidad ó visibilidad solo es relativa á la constitucion de nuestros ojos, y no á la naturaleza de las moléculas que producen en nosotros estas sensaciones. En fin, puesto que, segun las observaciones de De Laroche, el calórico obscuro, emanado de un cuerpo que se calienta gradualmente, se acerca tambien gradualmente á las condiciones y propiedades del calórico luminoso, se concibe que cuando la emanacion empieza á hacerse luminosa, debe ser al principio análoga á la parte menos calorífica del espectro, que es la que se halla en el estremo violado. Asi se observa que todas las llamas, al empezar á nacer, son violadas ó azules, y no llegan á la blancura hasta que adquieren un grado mayor de intensidad (1). Sin embargo, estas analogías, por la

(1) Esta progresion de tintas se verifica aun en la luz que escita en el aire la chispa eléctrica. Mr. Biot lo ha comprobado sacando estas chispas á diferentes distancias entre una punta roma y una esfera metálica; disposicion que proporciona el obtener un rayo contínuo, cuya intensidad se modera por la distancia, segun se quiere.

misma razon que que nos indican un estado progresivo, no escluyen las propiedades particulares qué pueden pertenecer esclusivamente á tal ó tal fase de la progresion. Asi las emanaciones caloríficas de diferentes temperaturas, y las emanaciones luminosas de diferentes colores, podrán diferenciarse entre sí en la facultad de producir la vision, el calor, la accion química, en la transmisibilidad por medio de los cuerpos diáfanos, y acaso en otros muchos caractéres que los fisicos no han estudiado aun. Si esta induccion no debe colocarse en la clase de las verdades demostradas, á lo menos se ve que puede servir como una guia bastante fiel para descubrir las relaciones de los hechos; por lo mismo la emplearemos para este uso. Pero á fin de no dar á nuestras investigaciones otra base que la esperiencia, no introduciremos en ellas por ahora esta identidad que presumimos, y designaremos con una denominacion particular las emanaciones caloríficas obscuras que se dejan conocer á cierta distancia. Esta será la de *calórico radiante*, cuyas principales leyes vamos á estudiar.

CAPITULO II.

Leyes del enfriamiento y calentamiento de los cuerpos en los medios indefinidos.

Casi todas las nociones que pueden adquirirse sobre la irradiacion del calórico se obtienen observando el enfriamiento y calentamiento progresivo de los cuerpos en diferentes medios de una temperatura uniforme, ya resulten estas modificaciones únicamente de la emision libre del calórico y del contacto del medio, ya provengan tambien de la influencia inmediata de algun otro cuerpo. Consideraremos desde luego el primer caso por ser el mas sencillo.

Para realizarle es preciso tomar un cuerpo, cuya

temperatura media podamos conocer cada momento, el cual, despues de calentado hasta ciero grado, le pondremos en suspension en una atmósfera tranquila de aire, y observaremos con un relox de segundos los progresos de su enfriamiento. Nada es mas á propósito para este objeto que un vaso cilíndrico AB, fig. 4, de metal delgado, atravesado en toda su longitud por el depósito, igualmente cilíndrico, de un termómetro, cuyo tubo dividido sale á la parte de afuera. Un tubito que hay en la parte superior del vaso sirve para llenarle de agua hirviendo ó de cualquier otro líquido, cerrándole en seguida con un tapon muy ajustado, para evitar el enfriamiento que resultaria de la evaporacion. Hecho esto, se coloca el aparato en una pieza bastante grande para que no pueda hacer variar sensiblemente su temperatura, y se coloca sobre un pie de madera que le toque en muy pocos puntos, á fin de que no le quite una parte sensible de su calor. Entonces se ve bajar gradualmente el termómetro interior, y se observan con un buen relox los instantes en que llega á los diferentes grados de su escala. Se observa igualmente la temperatura de la pieza por medio de un termómetro fijo, colocado fuera del influjo del vaso. En fin, para que la esperiencia sea enteramente exacta es preciso nó permanecer dentro del cuarto en los intervalos de las observaciones, pues esto modificaria necesariamente la temperatura del aire y el enfriamiento del vaso, sino que deberá entrarse de cuando en cuando para observar el estado del termómetro, lo cual puede hacerse desde lejos con un anteojo fijo; y aun conviene que esten cerradas las ventanas en los intervalos de las observaciones, á fin de evitar las agitaciones que puede producir en el aire la accion de la luz esterior.

He aqui los pormenores de una esperiencia hecha de este modo por Rumford con dos vasos de hoja de laton que tenian cuatro pulgadas de diá-

metro y otras cuatro de altura. Las superficies de sus bases eran perfectamente semejantes; pero las paredes laterales del número 1 estaban *descubiertas*, y las del número 2 *cubiertas* con una tela blanca, fina, ajustada exactamente á la superficie metálica. Los tiempos estan espresados en horas y minutos sexagesimales, y las temperaturas en grados del termómetro de Foreuhcit.

Tiempo. H.	Tiempo. M.	Temperatura. N.° 1 descubierto.	Temperatura. N.° 2 cubierto.	Temperatura del aire.
10	10	126° ½	126°	43° ½
—	30	109 ½	106½	43 ½
—	45	105	100½	43 ¾
11	—	101 ⅛	94¾	44
—	2½	—	94	—
—	15	97 ½	90¼	—
—	30	94	86¼	—
—	39	—	84	—
—	45	91 ¼	82½	—
12	—	88 ½	79⅜	—
—	15	85 ½	76	—
—	25	84	—	—
—	30	—	74½	—
—	45	80	70	—
1	—	78	68⅛	—
—	30	74 ¼	64¼	—
2	—	71 ⅛	61½	43 ¾
—	30	68 ⅛	58¾	43 ½
3	—	65 ¾	56¾	—
—	30	63 ½	54¾	—

Tiempo. H.	Tiempo. M.	Temperatura. N.° 1 descubierto.	Temperatura. N.° 2 cubierto.	Temperatura del aire.
4	—	61° ¾	53° ½	34° ¼
—	30	59 ½	52	—
5	30	57	49 ¾	42 ½
6	—	55 ½	49 ⅛	—
—	30	54 ¼	48 ¼	—
7	—	53 ½	47 ½	42
8	—	51 ¼	46 ½	—
9	—	50	45 ¾	—
10	—	49	45	—
8	—	43	42	40
12 de Marzo se trasladan los instrumentos á una pieza caliente.				
8	2	43	42	62
—	32	44 ¾	44 ¼	62 ½
—	47	46	46 ½	63
9	24	48	49 ½	—
10	—	50	52	—
—	41	51 ½	53 ⅞	—
12	—	54	56 ½	—
12	26	54 ½	57	—
Se termina la esperiencia.				

La simple vista de esta tabla manifiesta una gran diferencia en la marcha de los dos instrumentos; el que estaba cubierto de tela se enfrió con mucha mas rapidez que el otro. Pronto volveremos á tra-

tar de este hecho, qué proviéne de una de las leyes mas notables de la irradiacion del calórico. Por ahora limitémonos á considerar la marcha de cada instrumento, y empecemos por el número 1.

La primera consideracion que se presenta es que la temperatura del instrumento ha bajado rápidamente los primeros instantes en que era mucho mas alta que la de la atmósfera circundante; y despues se ha retardado su marcha al paso que ha ido siendo menor esta diferencia; de suerte que la igualdad rigorosa de temperaturas parece un límite, á que no puede llegarse sinó al infinito. Esto es enteramente análogo á lo que hemos observado ya en la pérdida de la electricidad por el contacto del aire, y la ley es la misma, porque el descenso del termómetro del aparato en un tiempo muy pequeño es sensiblemente proporcional al esceso actual de su temperatura sobre la del aire que le rodea. Esta ley se observa igualmente en el calentamiento de los cuerpos cuando su temperatura es inferior á la del medio que los rodea. Reduciéndola á fórmula da medios para calcular el grado á que se hallará el termómetro del aparato en un momento cualquiera por la observacion de los grados que ha marcado en dos momentos conocidos. Esta determinacion se obtiene por un simple cálculo de logaritmos, cuyo método se halle aplicado numéricamente á las esperiencias anteriores y á otras muchas hechas en el aire y en diferentes líquidos; pues la naturaleza de la progresion es la misma en todos los medios, y solo varía la velocidad absoluta.

El descubrimiento de estos resultados se debe á Newton, quien, considerando la temperatura como efecto de todo el calor libre de los cuerpos, juzgó que dos cuerpos puestos en contacto debian comunicarse mútuamente en cada instante infinitamente pequeño cantidades de calórico proporcionales á las que ellos poseían. Newton comprobó esta ley por medio de esperiencias directas; pero parece que la

estendió demasiado, queriendo seguirla en toda la escala de las temperaturas. Una larga serie de esperiencias hechas por De Laroche prueba de un modo incontestable que la proporcionalidad que Newton supone no es mas que una aproximacion, cuyo uso es ciertamente útil cuando es pequeña la diferencia de temperatura de los cuerpos en contacto; pero se separa de la verdad al paso que se hace mayor esta diferencia. En este caso las cantidades de calórico que pierde el cuerpo mas caliente crecen en una progresion mucho mas rápida que la que supone la simple proporcion. La separacion es insensible en las temperaturas inferiores á 100°, y esta es la razon por qué se ocultó á Newton y á otros observadores, cuyas esperiencias se reducian ordinariamenee á este límite. Se observa tambien una aceleracion semejante cuando en vez de verificarse la comunicacion del calor por contacto se verifica á distancia por la irradiacion directa ó refleja de un cuerpo sobre otro. La ley de Newton se aplica tambien á este caso, en tanto que es poco considerable la diferencia de temperatura de ambos cuerpos; pero da falsos resultados cuando esta diferencia es mayor que 100°.

En esta serie de esperiencias fue donde descubrió De Laroche el precioso hecho de que hemos hablado antes, á saber, que la proporcion del calórico radiante, que atraviesa una lámina de vidrio, aumenta, al paso que el calórico emana de un cuerpo mas caliente. Insensible al principio, cuando el cuerpo tiene solo una temperatura baja, se eleva progresivamente hasta el estado en que aquel se hace luminoso, y aun entonces aumenta á medida que su luz se hace mas viva. ¿No es, pues, esta, como ya hemos observado, una indicacion muy verosímil de la identidad de la naturaleza entre el calórico y la luz, no siendo esta otra cosa que el calórico radiante emanado de un manantial caliente, lo bastante para hacerla sensible á nuestros ojos?

Para establecer estos importantes resultados, De Laroche empezó buscando medios seguros para elevar sucesivamente un mismo cuerpo á diferentes temperaturas fijas. En seguida observó respecto á cada una de estas temperaturas la influencia calorífica que ejercia el cuerpo á distancia sobre un termómetro fijo, ó sobre cubos de hielo á 0° de un volúmen conocido, obrando primero directamente sin atravesar otro cuerpo que el aire, y despues una pantalla de vidrio interpuesta. Pero para corregir en el último caso, lo que se podia deber al calentamiento y á la irradiacion propia de la lámina de vidrio, volvia á empezar tercera vez la esperiencia, ennegreciendo la primera superficie de la lámina, lo cual hacia imposible toda transmision directa; y tomando el efecto termométrico producido en esta circunstancia por equivalente al calentamiento propio del vidrio descubierto, le rebajaba del efecto total observado. Esta sustraccion le daba un resíduo ciertamente inferior y nunca superior al efecto de la transmision sola; y sin embargo, este resto es el que, comparado con la diferencia total de las temperaturas del cuerpo caliente y del termómetro, crecia en una proporcion tan rápida. De todas las esperiencias hechas por De Laroche la mas evidente y segura es la que sigue. Modificó por medio de diafragmas el número de rayos caloríficos que podian llegar al termómetro, de modo que el efecto que este sufriese atravesando el aire solo fuese igual en diversas temperaturas del cuerpo caliente; esta igualdad la establecia por medio de la esperiencia, y se concibe bien que siempre es posible conseguirla. Entonces, si la parte de calórico transmitida al través del vidrio hubiese sido constante, la misma igualdad de efectos se hubiera debido observar interponiendo en el camino de los rayos una pantalla de vidrio, despues de haber quitado como antes del resultado la pequeña parte del efecto, debida al calentamiento propio de esta lá-

mina. Ahora bien, no ha sucedido asi, sino que la proporcion de calor transmitida al través del vidrio ha aumentado rápidamente al mismo tiempo que la temperatura del manantial, aunque el efecto directo habia sido el mismo en todos los casos. Si algun fisico vuelve á emprender estas esperiencias será útil que examine si esta progresion es diferente á temperaturas iguales, segun la sustancia del cuerpo radiante y el estado de su superficie; porque puesto que resulta demostrado que las moléculas caloríficas emanadas de un cuerpo caliente no se hallan modificadas del mismo modo á todas las temperaturas, puesto que en unas atraviesan el vidrio con mas facilidad que en otras, seria posible que ciertos cuerpos emitiesen con mayor abundancia tal ó tal especie de partículas, asi como ciertas llamas emiten mayor número de rayos azules y otras de verdes, lo cual las hace parecer verdes ó azules por comparacion. En este caso podria ser que la influencia calorífica de tal cuerpo fuese mas propia que la de otro para producir ciertos fenómenos, por ejemplo, las combinaciones químicas que el calórico obscuro del estremo violado del espectro parece que puede determinar mas que nada. El aumento de transmisibilidad de los rayos caloríficos por el vidrio, y probablemente por las demas sustancias diáfanas, puede tambien ser la causa, ó á lo menos una de las causas, del aumento rápido que se observa en la influencia calorífica de los cuerpos, al paso que se eleva su temperatura; porque si segun parece que indica todo, la irradiacion no solo emana de la superficie sino tambien de una pequeña profundidad en el interior del cuerpo, esta profundidad deberá aumentar al paso que se eleve la temperatura, puesto que la materia que forma el cuerpo se hará mas permeable á los rayos caloríficos, y esta doble circunstancia deberá producir una irradiacion mas abundante.

De Laroche ha establecido tambien sobre esto

una proposicion importante, á saber, que los rayos caloríficos que han atravesado perpendicularmente una lámina de vidrio se hacen proporcionalmente mas propios para atravesar otra segunda, pues el hacecillo transmitido por la primera sufre en la segunda una pérdida menor. Las pruebas de este hecho se obtienen exactamente por los mismos métodos empleados para una sola lámina, y son tan seguras como en aquel caso. De ellas resulta que los rayos caloríficos transmitidos por el primer vidrio, ó son de una naturaleza particular, ó al atravesarle han adquirido cierto estado análogo á la polarizacion, que los hace mas á propósito para atravesar otra lámina.

En fin, por medio de estos mismos métodos De Laroche ha medido comparativamente las cantidades de calórico radiante transmitidas por láminas de vidrio de diferentes gruesos, espuestos en circunstancias semejantes á un mismo cuerpo caliente, y ha hallado que el aumento de grueso debilitaba la transmision en una proporcion considerable, hasta el punto de balancear y hacer nulas las ventajas de una transparencia mas perfecta. Una lámina de vidrio comun de 17 milímetros transmitia mucho mas calórico que un disco de cristal muy claro de 9 milímetros de grueso.

Tales son los resultados debidos á la sagacidad y á la infatigable paciencia de De Laroche; los cuales son del mayor interés, no solo por lo que prueban, sino por lo que hacen pensar. Los físicos que los continúen hallarán en ellos un abundante campo de investigaciones utilísimas; pero cualquiera que sea la perfeccion que consigan en ellos, siempre quedará á De Laroche el honor de haberles preparado el camino.

CAPITULO III.

Influencia del estado y naturaleza de las superficies sobre la irradiacion del calórico. Teoría de su equilibrio por medio de cambios.

En la primera esperiencia que hemos hecho sobre el calentamiento y enfriamiento de los cuerpos hemos hallado que dos vasos metálicos, de igual naturaleza, de la misma forma y llenos de agua á una misma temperatura, y diferentes solo en que el uno estaba descubierto, y el otro cubierto con un lienzo fino de Holanda, se han enfriado y calentado en las mismas circunstancias con diferentes velocidades, siendo mas rápida la del vaso cubierto que la del otro. Esta desigualdad proviene evidentemente de la cubierta, pues esta es la única diferencia que existe entre los dos aparatos. ¿Pero cómo resulta de ella este efecto? Las curiosas esperiencias de Mr. Leslie y las de Rumford, que vamos á esponer combinándolas de modo que sea mas sensible su verdad, nos lo manifiestan.

Tómense dos vasos metálicos pulimentados, semejantes á los usados por Rumford en la esperiencia citada, cuidando de que haya la mas perfecta semejanza en todos los pormenores de su construccion. Llénense ambos de agua á una misma temperatura, y examínense hasta asegurarse de que el calentamiento y enfriamiento en circunstancias iguales se verifican en ambos con una misma velocidad. Modifíquese entonces la superficie de uno de ellos de un modo cualquiera, por ejemplo, tapándola con alguna cubierta animal ó vejetal, ó dándola algun barniz, ó simplemente ennegreciéndola á la luz de una lámpara: lo cual la cubrirá de una capa de negro de humo de un grueso casi insensible. Al momento se alterará la igualdad, y generalmente el vaso cubierto se calentará y enfriará con mas velo-

cidad que aquel cuya superficie metálica conserve su pulimento. Ahora bien, siendo, por decirlo asi, inapreciables las cantidades de materia empleadas para modificar la superficie del otro vaso, y no pudiendo su grueso infinitamente pequeño influir de un modo sensible en la transmision del calor por comunicacion, es necesario inferir que la única modificacion que han producido en el estado de las superficies ha alterado la velocidad del enfriamiento por medio de la irradiacion, y en general la ha acelerado. Tambien se puede probar esta influencia de las superficies de otro modo, imaginado por Mr. Leslie. Tómese un cilindro metálico hueco, semejante á los vasos de Rumford, pero con la diferencia de que en vez de ser circular sean sus paredes laterales cuatro rectángulos perfectamente iguales, que distinguiremos con las letras *a*, *b*, *c*, *d*. Tápese el rectángulo *a* con una cubierta animal, por ejemplo, con un pedazo de tripa ó con un papel de escribir; el rectángulo *b* con una lámina de vidrio pulimentado; el *c* con una capa de negro de humo, y déjese al cuarto su brillo metálico y su pulimento natural. Llénese en seguida el vaso de agua á una temperatura bastante elevada, como de 60°; y esperando algunos minutos para que todas las partes del aparato tengan tiempo para ponerse á una misma temperatura, colóquese en un cuarto, cuya temperatura sea, por ejemplo, de 10 grados; y preséntese por una de sus superficies á alguna distancia de un termóscopo muy sensible, puesto desde mucho tiempo antes á la temperatura del sitio donde se hace la operacion, fig. 5; al momento será rechazado el líquido por efecto del calentamiento y dilatacion del aire contenido en la bola mas inmediata al vaso caliente. Pero la cantidad que se retirará (y este es el punto capital) será diferente, segun la superficie que se le haya presentado; y la repulsion será la mayor cuando sea la superficie cubierta de negro la que mire al termóscopo; será un

poco menor cuando le mire la cubierta con tripa, papel ó vidrio, y la menor de todas cuando obre la cara descubierta. Esta desigualdad en la influencia, producida por las diferentes partes de un mismo cuerpo, sóstenidas constantemente á una temperatura comun, nos obliga á inferir que las cantidades de calórico radiante, emitidas por un cuerpo en un tiempo dado, no dependen solo de la forma de este cuerpo, de su tamaño y temperatura, sino tambien del estado de su superficie; y las esperiencias anteriores, miradas bajo este punto de vista, manifiestan que de todas las superficies, las que han recibido el pulimento metálico son las que irradian menos á temperatura igual, y que las formadas por sustancias vejetales, por ejemplo, de negro de humo, son las que irradian mas. En fin, puesto que hemos hallado que los cuerpos que se enfrian con mas velocidad se calientan del mismo modo, es preciso tambien inferir esta otra propiedad general; las superficies que en iguales circunstancias irradian el calórico en mayor abundancia que otras, le absorven tambien mas abundantemente por irradiacion. He aqui una tabla de las facultades radiantes y reflejantes de diferentes sustancias hecha por Mr. Leslie.

PODER RADIANTE.		PODER REFLEJANTE.	
Negro de humo. .	100	Cobre amarillo. . .	100
Agua.	100	Plata.	90
Papel de escribir.	98	Estaño en hoja. . .	80
Crown-glass.	90	Acero.	70
Tinta de China. . .	88	Plomo.	60
Agua helada. . . .	85	Estaño mezclado con mercurio. .	10
Mercurio.	20	Vidrio.	10
Plomo brillante . .	19	Vidrio untado de aceite.	5
Hierro pulimentado.	15		
Estaño, plata, cobre, oro.	12		

NOTA. Estas evaluaciones no deben tomarse como absolutas, pues solo indican diferencias.

Las observaciones que nos hacen conocer estas diferencias en la intensidad de las falcultades radiantes, no nos presenta ningun cuerpo en que sea absolutamente nula esta facultad. El mismo hielo, que tan frio nos parece al tacto, se haria calentador si le transportasemos á un sitio cuya temperatura estuviese á 20° bajo cero; y una masa de hielo á punto de derretirse, presentada entonces á la bola de un termóscopo, rechazaria el líquido como el vaso lleno de agua caliente, en las esperiencias anteriores. Una mezcla de nieve y sal, enfriada hasta 20° bajo cero, seria del mismo modo un cuerpo caliente si se la transportase á una atmósfera que estuviese á —40°. En todo esto, del mismo modo que en nuestras sensaciones, no se halla nada absoluto, y solo son simples diferentes. De este modo nos vemos conducidos á considerar todos los cuerpos como radiantes á cualquiera temperatura, sino que con diferentes intensidades, segun su naturaleza, el estado de sus superficies, y la temperatura á que

se hallan. En este caso, la constancia de la temperatura de un cuerpo consistirá en la igualdad de las cantidades del calórico radiante que emite y recibe en igual tiempo; y la igualdad de temperatura en muchos cuerpos, que sienten el influjo unos de otros por su irradiacion mútua, consistirá en la perfecta compensacion de los cambios instantáneos que se verifiquen entre todos y cada uno de ellos. Tal es el ingenioso principio del *equilibrio movible*, imaginado por el profesor Prevost, de Ginebra; principio cuya aplicacion dirigida con acierto, y combinada con las propiedades particulares de las diferentes superficies, esplica todos los fenómenos que se observan en la distribucion del calórico radiante.

Obligados á renunciar aqui al socorro del cálculo, único que puede conducirnos á todos los pormenores de esta esplicacion, nos limitaremos á algunos ejemplos que presenten las consecuencias mas generales. Empezemos por el equilibrio de temperatura, é imaginaremos un termóscopo colocado en un aposento, cuyas partes se hallen todas á una misma temperatura, y supongamos que se le ha dejado en él bastante tiempo para tomar la misma. Tengamos tambien en el mismo aposento un disco opaco, de cualquiera forma y naturaleza, que igualmente se halle á la misma temperatura. Si se presenta este disco á la bola del termóscopo, no podrá hacer mover el líquido, y la razon es muy sencilla. Antes de que se acercase el disco, la bola recibia de las paredes y del aire del aposento cierto número de rayos caloríficos, ya directos ya reflejos, y emitia de ambos modos una cantidad exactamente igual, puesto que su temperatura permanecia constante. Cuando se le presenta el disco opaco, se interceptan respecto á cada punto de la bola todos los rayos caloríficos comprendidos en el cono, bajo el cual este punto ve el disco; pero en cambio aquel mismo punto recibe del disco cierto número de rayos comprendi-

de rayos caloríficos, que despues de haberse cruzado en él, caían sobre el espejo, se reflejaban al otro, y se concentraban sobre el termómetro. Estos rayos se hallan ahora interceptados por el cuerpo opaco colocado en el foco; pero como suponemos que este se halla á la misma temperatura que el espacio, envia, tanto por irradiacion como por reflexion, un número de rayos exactamente igual, que caen del mismo modo sobre el primer espejo, de este pasa al segundo, y se reflejan sobre el termómetro, de suerte que este no sufre ninguna especie de alteracion en la influencia que le afecta. El efecto será distinto, si el cuerpo colocado en el foco tiene una temperatura mas alta ó mas baja que la del espacio y el termómetro; pues entonces este, despues de la interposicion, recibiria por el intermedio de los espejos mas ó menos rayos que antes recibia; y por consiguiente mas ó menos de los que pierde en igual tiempo, ya por emision, ya por reflexion; resultando de aqui que su temperatura debe subir en el primer caso y bajar en el segundo. Asi lo comprueba la esperiencia. Por ejemplo, si la temperatura del aposento está á 20° y se coloca en el foco un matraz lleno de agua hirviendo, se verá al momento subir al termómetro colocado en el otro foco; y por el contrario bajará si en el primero se coloca un pedazo de hielo, y mas aun, si á este se sustituye una mezcla de sal y nieve, á una temperatura mas baja. Todos estos fenómenos son, como se ve, consecuencias necesarias de la igualdad de los cambios, y ofrecen una confirmacion evidente de ellos, como ha hecho ver antes que nadie el ingenioso autor de esta teoría. Para comprenderlos solo es necesario admitir que todos los cuerpos emiten rayos caloríficos, aun en las temperaturas mas bajas en que podamos colocarlos, en lo cual no hay nada que deba sorprendernos, y aun que no sea conforme con la mas evidente analogía, pues las ideas de calor y de frio no tienen nada de absoluto, y no espre-

dos en el cono que acabamos de considerar; y en razon de la igualdad de temperatura que hemos supuesto, este número es exactamente igual al que provenia de la parte de paredes sobre que se proyecta el disco. Asi, despues de la interposicion de este, cada punto de la bola recibe aun en igual tiempo el mismo calor que antes; y como no ha variado la cantidad del que emite, es evidente que deben permanecer constantes su temperatura y la de la bola.

No sucederá lo mismo, si se presenta al termóscopo un disco cuya temperatura sea mas ó menos elevada que la de la atmósfera; pues entonces el número de rayos caloríficos directos ó reflejos por este disco, en un tiempo dado, será en el primer caso mayor, y en el segundo menor que el que venia de la parte de paredes que cubre. Asi, suponiendo que su influencia calorífica obre solo sobre una de las bolas del termóscopo, sustrayendo á ella la otra, por la interposicion de una pantalla opaca, por ejemplo, de un papel dorado, la bola que ve al disco recibirá de él mas ó menos calor que el que despide, y por consiguiente, su temperatura deberá subir ó bajar; lo cual hará mover el líquido. El efecto será tanto mas sensible, cuanto mayor sea la diferencia entre la temperatura del disco y la del termóscopo, y mas enérgica la facultad radiante de su superficie.

El raciocinio será el mismo, si se transmite la accion colorífica por medio del aparato de espejos metálicos aparecidos. Colóquese, por ejemplo, un termómetro con la bola ennegrecida en el foco de uno de los espejos; y cuando haya tomado, asi como los espejos, la misma temperatura que la atmósfera circundante, colóquese en el otro foco un cuerpo cualquiera, que se halle á la misma temperatura; el termómetro no se alterará. En efecto, cuando aun se hallaba libre el paso por el otro foco, llegaban á este punto de todas partes cierto número

son sino simples diferencias. El hielo es frio respecto á un termómetro que sale del agua hirviendo; pero por el contrario es muy caliente respecto al que sale de una mezcla de sal amoniaco y nieve á 20°. Asi se esplican con la mayor sencillez todas las influencias relativas de estos cuerpos unos sobre otros, por la sola consideracion de las diferentes cantidades de calórico que desprenden, sin necesidad de recurrir, como lo han hecho algunos físicos, á la hipótesis de una pretendida irradiacion frigorífica, que ni es necesaria, ni aun se halla indicada por los hechos.

Una circunstancia muy propia para manifestar esta desigualdad de cambios, y hacer evidentes sus consecuencias, es la de esponer por la noche un cuerpo al aspecto libre de un cielo sereno, aislándole cuanto sea posible de toda causa terrestre que pueda calentarle. En tal caso todo el calor que irradie este cuerpo hácia los espacios celestes será perdido para él, y si lo que recibe del contacto del aire y de los cuerpos que le rodean no basta para compensar esta pérdida, deberá bajar su temperatura. En efecto, asi lo ha comprobado Mr. Ch. Weels, aplicando inmediatamente termómetros de depósito plano á los cuerpos espuestos de este modo. Se concibe fácilmente que la serenidad del cielo es necesaria para que se verifique la pérdida del calórico radiante, pues las nubes, como cualquier otro cuerpo diáfano, deben de tener, segun las esperiencias de De-Laroche, el calórico que no emane de un cuerpo muy caliente. El mejor medio de hacer la esperiencia es colocar un termómetro en el foco de un espejo metálico cóncavo, dirigido hácia el cielo. El metal calienta poco el termómetro por la poca irradiacion que produce; pero como refleja bien, le pone en una comunicacion rápida con una parte mayor del espacio, y acelera asi su enfriamiento. Esta disposicion ha sido inventada por Mr. Wollaston. Es claro que la

esperiencia debe salir mejor en un tiempo tranquilo que cuando el aire está agitado, pues en el último caso, el contacto de este fluido, renovado perpendicularmente, debe reparar mas las pérdidas que sufre el termómetro. Pero lo dicho ya basta para indicar las numerosas consecuencias de este principio.

Tal es, como ha hecho ver Mr. Ch. Wecls, la causa del rocío y de la escarcha. Cuando los cuerpos espuestos al aspecto de un cielo sereno llegan á enfriarse hasta un grado bastante inferior á la temperatura del aire que los rodea, producen una precipitacion de agua sobre su superficie, que es el rocío, y si su grado de frio es bastante enérgico, ó si se hallan aislados de toda comunicacion con otros cuerpos, hielan esta agua. De este modo producen el hielo en grande en Bengala desde tiempo inmemorial. Segun esto se ve que el rocío se depositará con mas dificultad sobre los cuerpos cuya irradiacion es menor, como los metales pulimentados, pues entonces, tiene el aire mas proporcion de calentarlos. Asi rara vez se halla en ellos, mientras se ve con mucha abundancia sobre el vidrio, que es una sustancia muy radiante. Del mismo modo se concibe, por qué no se halla rocío sino cuando el cielo está sereno, y el aire no sufre ninguna agitacion.

CAPITULO IV.

Leyes de la propagacion del calor en los cuerpos sólidos.

Cuando una barra metálica está sumergida por uno de sus estremos en un medio mas caliente que el aire que la rodea, como por ejemplo, en el fuego de una fragua, ó en un metal en fusion, todo el mundo sabe que el calor no se comunica instantáneamente al otro estremo; en el cual no se deja

sentir sino al cabo de cierto tiempo, mas ó menos largo, que depende de la naturaleza y dimensiones de la barra. Tratemos de analizar este efecto.

Para esto, consideremos una barra cilíndrica indefinida A B, fig. 6, suficientemente delgada para que todos los puntos de una de sus secciones transversales puedan suponerse á un mismo tiempo á igual temperatura, y supongamos el estremo A en contacto con un manantial constante de calor que obre inmediatamente sobre él solo, hallándose resguardado de su irradiacion el resto de la barra por medio de pantallas pulimentadas. Tomadas estas disposiciones, el calor empezará á propagarse progresivamente desde A hácia B, atravesando la materia de la barra; y si en diferentes puntos de este se colocan termómetros cuyas bolas estén introducidas en agujeros hechos en el mismo metal, y llenos de mercurio para hacer mas íntimo el contacto, se verán subir sucesivamente estos termómetros empezando por los mas inmediatos al manantial. Durante este movimiento, consideremos en la barra tres elementos cilíndricos contiguos, ′M, M, M′, suficientemente pequeños, para poderlos considerar como simples puntos. El elemento intermedio M recibirá á cada momento calor del que le precede, y le comunicará al que le sigue. Asi, suponiendo que la temperatura no sea demasiado elevada, podremos admitir la ley observada por Newton, y el termómetro M deberá, en virtud de esta sola causa, sufrir al mismo tiempo una pequeña elevacion proporcional al esceso de la temperatura de ′M sobre la suya, y un pequeño descenso, proporcional al esceso de esta sobre la de M′, de suerte que solo le quedará la diferencia. Por consiguente, sino se verificase ninguna pérdida de calor, es claro que cada termómetro subiria continuamente hasta llegar á la misma temperatura que el manantial, lo cual, en rigor, no podria verificarce sino pasado un tiempo infinito. Pero la irradiaccion modifica es-

te resultado en todas las esperiencias, pues luego que cada elemento de la barra tiene un grado de calor superior al de la atmósfera que le rodea, envia á este aire mayor cantidad de calórico que la que recibe en igual tiempo; y en los límites de temperatura que hemos supuesto, esta causa produce á cada momento en cada termómetro M un pequeño descenso, proporcional al esceso de su temperatura actual sobre la del aire. De aqui resulta que los termómetros suben con menos velocidad que suponiamos anteriormente, y no pueden llegar nunca á la temperatura del manantial, ni aun despues de un tiempo infinito; pues deben detenerse cuando el esceso de temperatura que comunica á cada instante al termómetro M, el anterior 'M no hace mas que compensar exactamente lo que pierde por el contacto con el elemento siguiente M' y por la irradiacion al aire. Entonces permanece estacionario el estado termométrico de la barra, y la temperatura de sus puntos va disminuyendo al paso que se hallan mas separados del manantial constante de calor.

La enunciacion algebráica de las condiciones anteriores conduce á una fórmula que da la temperatura de cada termómetro, en un momento cualquiera, en funcion de sus distancias al manantial, y de la temperatura de este; pero se halla que las reglas del cálculo no pueden satisfacerse suponiendo que cada punto material é infinitamente pequeño de la barra no recibe calor sino por el contacto del punto material anterior, ni le comunica sino al que sigue: esta dificultad solo puede salvarse, admitiendo, como ha hecho Mr. Laplace, que un mismo punto siente á la vez la influencia no solo de los que le tocan, sino de los que se hallan inmediatos á él, á una pequeña distancia antes ó despues. Entonces se restablece la homogeneidad, y se observan todas las reglas del cálculo diferencial. Ahora bien, para que la influencia calorífica se haga sentir asi á distancia en el interior de

la barra, es necesario que se produzca al traves de la sustancia de los elementos de ella una verdadera irradiacion análoga á la que hemos observado al traves de las sustancias diáfanas, pero cuya influencia sensible está limitada á distancias incomparablemente mas pequeñas. Este resultado nada tiene que deba sorprendernos. En efecto, Newton nos ha hecho ver, que todos los cuerpos, aun los mas opacos, se hacen transparentes cuando estan suficientemente adelgazados, y todas las observaciones sobre el calórico radiante nos han indicado ya que este no solo emana de la superficie esterior de los cuerpos, sino tambien de las moléculas interiores situadas bajo esta superficie debilitándose mas y mas, hasta llegar á ser insensibles á una profundidad muy pequeña, que probablemente varía en un mismo cuerpo segun su temperatura. Todas estas consideraciones, tan diferentes en las circunstancias á que se aplican, conducen, como se ve, á un mismo punto, y el mecanismo del cálculo acaba de manifestarnos su necesidad.

La propagacion del calor en los cuerpos sólidos, cuyas dimensiones son todas sensibles, depende tambien de los mismos principios. Entonces cada punto del interior del cuerpo comunica el calor á todos los que lo rodean á una pequeña distancia, y le recibe de ellos. El esceso de esta segunda cantidad sobre la primera constituye lo que conserva, y determina proporcionalmente la cantidad que debe aumentar en cada instante su temperatura propia. Pero respecto á los puntos situados en la superficie del cuerpo, no les queda entera esta diferencia, pues se debilita por la irradiacion, proporcionalmente al esceso de la temperatura de la superficie sobre la del medio que la rodea, lo cual da respecto á estos puntos una condicion mas que hay que unir á la ecuacion general de la propagacion. Mr. Fourier habia formado primeramente esta condicion para una esfera y un

cilindro, y la habia estendido por analogía á un cuerpo de cualquiera figura. Mr. Poisson la ha demostrado en general del modo siguiente. Considerando el cuerpo caliente como una masa indefinida, establece mentalmente en su interior una pared de una figura cualquiera, que le dibida en dos partes diferentes, y evalúa la cantidad total de calor que pasa en cada instante de una de estas partes á la otra por la superficie de separacion. Ahora bien, si se suprime uno de los dos segmentos, y se quita al otro por la irradiacion la misma cantidad de calor que comunicaba á la parte suprimida, es claro que el equilibrio de calor no se alterará en la parte conservada, y que su distribucion y movimiento permanecerán lo mismo que antes. De aqui resulta que se obtendrá la condicion analítica relativa á los puntos de la superficie, suponiéndola radiante, valuando la elevacion de temperatura que se comunica en cada instante desde adentro á cada uno de estos puntos, é igualando esta cantidad al descenso instantáneo que debe producir la irradiacion. Este método ha conducido en efecto á Mr. Poisson á la misma ecuacion que habia obtenido ya Mr. Fourier.

Todas las consideraciones anteriores estan fundadas en la ley de comunicacion del calor, adoptada por Newton; y por consiguiente deben dejar de ser aplicables á las temperaturas elevadas en que no se verifica aquella ley. Las fórmulas suponen ademas, que las cualidades fisicas de que dependen la conductibilidad y la irradiacion, son las mismas en toda la estension de la barra; mas yo he comprobado por esperiencia que no hay tal constancia aun en las barras homogéneas, cuando sus diversas partes tienen temperaturas desiguales, que sin ser muy elevadas, son sin embargo comparables á la que puede producir su fusion.

La esperiencia manifiesta que diferentes barras, aun metálicas, sumergidas por un estremo en una

temperatura constante, propagan el calor con mas ó menos rapidez. Segun las esperiencias de Ingenhouse, la plata y el oro son los metales mas conductores; en seguida vienen el cobre, el estaño, la platina, con corta diferencia iguales entre sí, y en fin el hierro, el acero y el plomo, que son muy inferiores á los demas. El vidrio, la porcelana, la tierra de alfarero conducen menos que los metales. El carbon y las diferentes especies de madera, cuando estan bien secas, conducen aun peor. Pero segun una observacion muy útil de Rumford nada comunica menos el calor, en igualdad de peso, que las sustancias compuestas de filamentos muy finos, ó de particulitas que se tocan por muy pocos puntos, como el cuero, la lana en vellones, la seda sin hilar, la pelusa, el salvado &c. Esto puede provenir de que siendo muy pequeñas las partículas que componen estas sustancias, y estando muy separadas, se produce entre ellas un gran número de reflexiones; y tambien de que retienen el aire, como sujeto en sus inmediaciones, ya sea por una afinidad propia, que hace fijar sobre su superficie una capa delgada de este fluido, ya simplemente por el obstáculo mecánico que oponen á su movimiento; cuyas dos causas deben igualmente impedir que se renueve, llevándose consigo el calor.

CAPITULO V.

De la capacidad de los cuerpos respecto al calórico.

En todas las esperiencias que hemos esplicado hasta ahora sobre la propagacion y comunicacion del calor, hemos considerado únicamente los aumentos ó diminuciones de temperatura. Ahora es necesario tratar de conocer qué relaciones existen entre estas variaciones y las cantidades absolutas de calor absorvidas por los cuerpos, ó desprendidas de

ellos. Esta investigacion será muy á propósito para fijar las ideas que debemos tener de la naturaleza del principio que produce el calor.

El medio mas directo de descubrir estas relaciones consiste en hacer enfriar un mismo cuerpo, sucesivamente un número determinado de grados, y emplear el calórico que se desprende de él para producir un mismo efecto siempre idéntico, cuya repeticion puede servir de medida. Esta ventaja se obtiene con la fusion del hielo. Hemos visto que el hielo al derretirse tiene una temperatura fija, y que todo el calor que se le comunica se emplea únicamente en derretirle. Luego si á cada instante se estrae el agua que produce, y se presenta incesantemente á la accion del calórico una nueva cantidad de hielo, el efecto será siempre idénticamente semejante á sí mismo, y una cantidad doble ó triple de hielo derretido exigirá evidentemente una cantidad doble ó triple de calor; de suerte, que se valuará la proporcion de esta última, que no puede verse por la cantidad de hielo fundido, que se puede pesar. No falta, pues, mas que realizar este pensamiento, y tal es el objeto del instrumento inventado por los Sres. Lavoisier y Laplace, al que han dado el nombre de *calorimetro*.

Se compone de dos vasos metálicos semejantes A B C D, A′ B′ C′ D′, fig. 7, contenidos uno dentro de otro, y que se mantienen separados por medio de barritas de metal, que seria mejor que fuesen de madera ó de vidrio. El intervalo de estos dos vasos se llena de hielo machacado y colocado de modo que forme una cubierta contínua. Para introducirle se levanta la tapadera A B, que vuelve á colocarse despues que está lleno de hielo el aparato. Es claro que teniendo cuidado de renovar constantemente este hielo al paso que se funde por efecto de la temperatura de la atmósfera, suponiéndola mas elevada que 0°, el vaso interior A′ B′ C′ D′, y la capacidad que contiene se mantendrán constan-

temente á 0°. Pero para poder efectuar esta renovacion, es preciso estraer el agua que produce la fusion progresiva, y este es el objeto de una llave lateral, colocada en la parte inferior del intervalo de los dos vasos.

Ahora bien, dentro del vaso interior se cuelga otro mas pequeño A″B″C″D″, formado por una red de arambre de hierro, y destinado á contener el cuerpo que se quiere hacer enfriar. El intervalo entre este tercer vaso y el segundo está igualmente lleno de pedazos pequeños de hielo que se introducen del mismo modo, levantando la tapa A′ B′: y el agua que produce sale por una llave inferior R′ á un vaso en que se recoge para pesarla exactamente. Esto supuesto, admitamos por un momento que el aire esterior no puede llegar absolutamente al interior del calorímetro. Entonces, pasado un tiempo mas ó menos considerable, el hielo interior llegará á la temperatura del intervalo esterior, es decir, á 0°; y en este grado se mantendrá invariablemente, mientras no esté enteramente fundida la cubierta esterior de hielo. Pero introdúzcase en el vaso interior A″B″C″D″ un cuerpo cuya temperatura sea mas elevada que cero; este cuerpo se enfriará gradualmente, y al enfriarse derretirá el hielo que le rodea, lo cual producirá cierta cantidad de agua que saldrá por la llave R′. Si se recoge esta agua y se pesa, será evidentemente la medida de la cantidad de calor que se ha desprendido del cuerpo al enfriarse hasta 0°.

Para hacer bien la esperiencia son necesarias algunas precauciones. Desde luego es menester no emplear hielo mas frio que 0°, porque todo el calor que se desprendiese del cuerpo interior se emplearía en elevar el hielo á esta temperatura antes de derretirle, y por consiguiente quedaría asi disimulado. Este inconveniente se evita empleando hielo próximo á derretirse, y haciendo la esperiencia en una temperatura que mas bien esté uno ó

dos grados sobre o que debajo; pues asi se estará seguro de que la temperatura del hielo que se emplea está realmente á 0° como se desea, pues se mantiene á este grado fijo, mientras no se derrite enteramente. Esto presenta tambien otra ventaja. Nunca se puede evitar absolutamente la introduccion del aire esterior en el calorímetro; y si estuviese mucho mas caliente que el hielo, derretiría una parte de él que podría ser sensible, y alteraría los resultados, y si por el contrario estuviese mas frio que 0°, haría bajar la temperatura del hielo, y le impediría derretirse. Respecto á esto, son de poca influencia dos ó tres grados mas, á causa de la poca densidad del aire, y aumenta las ocasiones de hacer la esperiencia. Pero esta será mas exacta, si obrando siempre en temperaturas un poco superiores á 0°, se tiene cuidado de tener un segundo calorímetro exactamente igual al primero y cargado de mismo modo; con sola la diferencia de no poner en su interior cuerpo alguno caliente. En tal caso la cantidad de hielo derretido en este, dará inmediatamente el efecto de la temperatura del aire. Para hacer ambos calorímetros exactamente comparables, despues de haberlos cargado, se dejarán escurrir algun tiempo, por ejemplo, una hora; se arojará el agua que uno y otro hayan producido, é introduciendo en uno de ellos el cuerpo caliente, se empezarán á observar de nuevo. Cuando el enfriamiento haya concluido, lo cual se conocerá en la lentitud de la fusion, se pesarán las cantidades de agua formadas en ambos calorímetros, y restando una de otra, la diferencia espresará lo que ha producido la accion del cuerpo caliente introducido en uno de ellos; y en fin, para mayor seguridad se podrá alternar la esperiencia.

Aqui se presenta una dificultad. Cuando se saca este cuerpo, cada pedacito del hielo sólido que queda en el aparato, retiene en su superficie una capita muy delgada del agua que ha formado. Está

á la misma temperatura, no derretirá mas que tres kilógramos. El conocimiento de la masa es aqui un elemento esencial; porque una masa doble ó triple de un mismo cuerpo derrite en circunstancias semejantes una cantidad doble ó triple de hielo.

Para formarnos una idea exacta de estos resultados, y desenvolver con seguridad las consecuencias que se deducen de ellos, tenemos por unidad de calórico la cantidad incógnita de este principio necesaria para derretir un kilógramo de hielo á 0°, y representemos por x el número total é incógnito de unidades semejantes que se contienen en cada kilógramo de un cuerpo A á la temperatura del hielo al derretirse, de cualquier manera que se halle en él este calórico, ya esté combinado y fijo, ya movible y capaz de cambiarse por la irradiacion por el de otros cuerpos del espacio, ó ya en fin esté parcialmente en ambos estados. Si elevamos la temperatura de A hasta T grados del termómetro de mercurio, y en seguida le dejamos enfriar hasta 0° en el calorímetro, derretirá cierto número de kilógramos de hielo, que podemos representar por N; luego segun nuestras convenciones anteriores N espresará tambien la nueva cantidad de calórico que ha sido necesario introducir en el cuerpo para elevar su temperatura á T°. Ahora bien, la esperiencia manifiesta que entre 0 y 100°, el número N es proporcional al número T de grados, á lo menos cuando el cuerpo no muda de estado. Por consiguiente si dividimos N por T, el cociente $\frac{N}{T}$ que llamaremos c, espresará entre estos límites el número de kilógramos de hielo que el cuerpo puede derretir al bajar un grado su temperatura; y el mismo cociente espresará tambien en funcion de nuestra unidad primitiva la cantidad de calórico necesaria para elevar ó bajar un grado su temperatura. Segun esto, respecto á cualquiera otra temperatura t comprendida tambien entre los límites de

capita, aunque delgada, debe formar una cantidad considerable en toda la masa de hielo contenida en el calorímetro. Esto es asi; pero si se ha procedido con las precauciones que hemos recomendado, es decir, en una atmósfera algo mas elevada que 0°, una capita de agua enteramente semejante adherida ya á la superficie de cada pedazo de hielo, al introducirle en el calorímetro el cuerpo caliente; y esta capita, que es la primera que debe haber escurrido, compensa exactamente la que conserva el hielo al acabar el enfriamiento.

Conviene tambien hacer observar que el espíritu de este aparato consiste principalmente en la ifluencia de la cubierta esterior de hielo comprendida entre los dos vasos metálicos A B C D, A′ B′ C′ D′, pues esta cubierta es la que mantiene á 0° la temperatura del hielo interior, y le impide derretirse sino por la accion del cuerpo introducido en el espacio que le contiene.

Supongamos que este cuerpo sea sólido, y de tal naturaleza que no varíe de estado desde la temperatura del hielo al derretirse hasta la del agua hirviendo; entonces habiéndole dado una temperatura cualquiera, comprendida entre estos límites, y medida en grados de un termómetro de mercurio, coloquémosle en el calorímetro, y dejémosle enfriar hasta 0°. Cuando haya llegado á este término hallaremos que la cantidad de hielo que ha derretido es proporcional al número de grados en que su temperatura escedia á la del calorímetro; de suerte, que si ha derretido un kilógramo, enfriándose desde 10° á 0°, derretirá dos enfriándose desde 20° á 0°, tres desde 30° á 0°, y asi sucesivamente en toda la estension de la escala termométrica. Pero la constante de esta progresion será diferente respecto á diversos cuerpos de igual masa. Por ejemplo, si un peso dado de palastro ó hierro batido, elevado á la temperatura de 30°, ha derretido 11 kilógramos de agua, el mismo peso de mercurio, elevado

la escala termométrica, $x+ct$ espresará la cantidad total de calórico contenida en A, y ct será el número de kilógramo de hielo que podrá derretir, enfriándose hasta 0°. Si la masa del cuerpo, en lugar de ser un kilógramo, fuese m, siendo la misma su naturaleza, seria necesario considerarla como compuesta de m kilógramos idénticos al primero; entonces la cantidad primitiva de calórico que contendria á 0° seria mx, y la que contendria á t grados seria $mx+mct$, espresando mct el número de kilógramos de hielo á 0° que podria derretir, enfriándose desde t á 0 grados en el calorímetro. Se ve, pues, que basta raciocinar sobre la unidad de masa, multiplicando el resultado por el número de estas unidades que contiene el cuerpo que se considera.

Segun lo que hemos dicho antes acerca de la comparacion del palastro con el mercurio, se ve que el número c varía de una sustancia á otra. Tambien varía en una misma sustancia, cuando esta cambia de estado, es decir, cuando de sólida pasa á líquida y de líquida á aeriforme ó reciprocamente; y es verosimil que estas variaciones empiecen á ser sensibles antes de efectuarse el cambio de estado. Es, pues, necesario determinar el número c por la observacion en diferentes circunstancias, y el resultado es lo que se llama *calor específico de los cuerpos.*

Si el cuerpo es sólido, se toma una masa conocida de él, se eleva á una temperatura determinada, y colocándole en el calorímetro, se pesa exactamente el agua, y se ve el número de kilógramos de hielo que ha derretido, enfriándose hasta 0°. Se divide este número por el producto de la masa del cuerpo y el número de grados que espresaba primitivamente su temperatura, es decir, por mt, y el cociente es el calor específico del cuerpo, respecto á la unidad de masa.

Se introdujo, por ejemplo, en el calorímetro una masa de palastro, que pesaba 3,772640 kilógramos, y cuya temperatura se habia elevado por

medio de un baño de agua hirviendo á 97°, 5 del termómetro centesimal. Al cabo de once horas toda la masa se habia enfriado hasta 0°, y el calorímetro bien escurrido dió 0,542004 kilógramos de hielo fundido. Asi, el calor específico *c* del palastro, segun nuestras demostracciones, será

$$\frac{0,542004}{3,77264.97,5} \quad \text{ó} \quad 0,0014735$$

Esta esperiencia la han hecho los Sres. Lavoisier y Laplace, pero con otras unidades de peso, y de temperatura, midiendo el peso en libras, y la temperatura en grados del termómetro de Reaumur. Habian empleado 7,7070319 libras de palastro elevado á 78° de R, que les dió 1,109795 libras de hielo derretido. Asi el calor específico del palastro en este sistema de unidades es

$$\frac{1,109795}{7,7070319.78} \quad \text{ó} \quad 0,001841875$$

Por este ejemplo se ve que el valor numérico de *c* es independiente de la unidad de peso que se haya elegido, pues la misma unidad se halla en el numerador y denominador de la fraccion que le espresa; pero no sucede lo mismo con la division termométrica que se emplea, pues esta solo se halla en el denominador. Segun esta observacion es fácil convertir unos en otros los resultados, multiplicando cada valor de *c* obtenido por cierto sistema de division, por la relacion de este sistema con aquel á que se quiere trasladar el resultado. Si se multiplica nuestro primer valor de *c* por $\frac{100}{80}$ se hallará el segundo, pues esto es lo mismo que reemplazar en el denominador, el factor 97,5 que espresa la temperatura centesimal por el factor $\frac{97,5 \ 80}{100}$ ó 78 que espresa la temperatura octogesimal.

Se pueden hacer independientes de esta reduccion los valores numéricos de *c* espresándolos todos con relacion á uno de ellos tomado por unidad. Entonces desaparece tambien el sistema de division em-

pleado para la temperatura, y los resultados son comunes á todos los sistemas. Asi es como lo han hecho los fisicos generalmente. Pero para poder deducir de estos resultados las cantidades absolutas de hielo que cada sustancia puede derretir al enfriarse entre límites dados, es necesario que se enuncie tambien el valor absoluto de c respecto á la sustancia á que se refieren todas las otras, y entonces es preciso especificar el sistema de division adoptado para espresar la temperatura.

Para conocer el calor específico de los líquidos se introducen en el calorímetro, colocándolos en vasos cuyo enfriamiento se ha observado de antemano, y determinado el calor específico. Cuando todo el sistema ha llegado á c^{o}, se observa el peso total del hielo derretido, se resta lo que el vaso debe haber derretido, y se divide el resto por el producto de la masa y temperatura del líquido.

Por ejemplo, queriendo los señores Lavoisier y Laplace determinar el calor específico del ácido nitroso, pusieron cuatro libras de este ácido en un matraz de vidrio sin plomo, que pesaba 0,53125 libras, y cuyo calor específico c con respecto á la division octogesimal, era 0,003215 en la unidad de masa. Elevaron todo el sistema por medio de un baño de agua hirviendo, hasta los 80° de R, y le colocaron en seguida en el calorímetro. Al cabo de 20 horas estaba terminado el enfriamiento, y la máquina dió 3,66406 libras de hielo derretido. El vaso solo deberia haber derretido 0,53125.0,003215.80, es decir, 0,1366 libras, que restadas de 3,66406, dan 3,5274, cantidad de hielo derretido por el líquido solo. Dividida esta cantidad por 320, producto de la masa del líquido y de su temperatura, resulta por calor específico del ácido nitroso 0,0110232. Si se quiere adoptar la division centesimal, habrá que multiplicar este resultado por $\frac{80}{100}$ y se tendrá 0,00881856.

Procediendo de este modo con el agua líquida

han hallado los mismos físicos que una libra de agua líquida elevada á la temperatura de 60° R ó 75° centesimales, derrite exactamente una libra de hielo, enfriándose hasta 0°. Por consiguiente el calor específico del agua adoptando la division octogesimal será $\frac{1}{60}$ ó 0,0166666, y si se adopta la centesimal $\frac{1}{75}$ ó 0,0133333.

Si se dividen por una ú otra de estas cantidades los calores específicos absolutos valuados en uno ú otro sistema, se tendrán los calores específicos *relativos*, esto es, con relacion al del agua tomada por unidad. Pero para que de estos valores puedan deducirse los resultados absolutos es preciso siempre añadir el calor específico absoluto del agua. He aquí algunos resultados de esta especie, obtenidos por los señores Lavoisier y Laplace.

Sustancias.	*Calor específico relativo.*
Agua comun.	1,00000
Palastro ó hierro batido.	0,11051
Vidrio sin plomo.	0,19290
Mercurio.	0,02900
Oxide rojo de mercurio.	0,05011
Plomo.	0,02819
Oxide rojo de plomo.	0,06227
Estaño.	0,04754
Azufre.	0,20850
Aceite de olivas.	0,30961
Cal viva del comercio.	0,21689
Mezcla de agua y cal viva, en la relacion de 9 á 16.	0,43912
Acido sulfúrico de 1,87058 de peso específico.	0,33460
Acido nitroso no humeante y de 1,29895 de peso específico.	0,66139

Segun la significacion que hemos dado al coeficiente c las relaciones contenidas en esta tabla pue-

den servir desde luego para trasladar numéricamen el calórico de una sustancia á otra de las contenidas en ella. El número 0,029 que corresponde al mercurio, indica que una masa de esta sustancia que se enfria un grado, pierde una cantidad de calórico suficiente para elevar $0^{o},029$ la temperatura de una masa igual de agua. Igualmente una masa de cal viva que se enfriase un grado, elevaría con el calor desprendido una masa igual de agua $0^{o},21689$. Síguese de aqui que el calórico desprendido de una masa de mercurio que se enfrie un grado, elevaría la temperatura de una masa igual de cal viva $\frac{0,\ 029}{0,21689}$ ó $0^{o},134$. En este punto es indiferente la escala en que se cuentan los grados, porque es la misma en ambas evaluaciones.

Ademas, si se multiplican los números de esta tabla por $\frac{1}{60}$ que espresa el calor específico absoluto del agua en grados de Reaumur, se tendrán las cantidades ponderables de hielo que un peso 1 de estas sustancias puede derretir enfriándose un grado de esta misma division. Si se multiplicasen los resultados por $\frac{1}{75}$ ó $\frac{4}{300}$, se tendria el resultado análogo, respecto á un grado centesimal; y estos serian los calores específicos *absolutos* de las sustancias contenidas en la tabla. Por ejemplo, dividiendo por 60 el número 0,66139 que corresponde al ácido nitroso se hallará el número 0,0110232 que obtuvimos antes por valor absoluto de su calor específico.

Se ve que el mercurio tiene un calor específico muy débil, pues para elevar un grado la temperatura de este líquido bastan $\frac{29}{1000}$ del calórico que necesitaria un peso igual de agua. La constancia del valor de c respecto al mercurio, en toda la estension de la escala termométrica, es tambien una cosa muy digna de observacion, pues de ella resulta que entre estos límites las cantidades de calor introducidas en esta sustancia son proporcionales al número de grados que se eleva su temperatura. Estos gra-

dos mismos se miden por la dilatacion del mercurio, y son proporcionales á ella; luego las dilataciones del mercurio en la estension de la escala termométrica son proporcionales á los aumentos de calórico que recibe.

Algunos fisicos, y particularmente Deluc y Crawford, han tratado de demostrar esto de otro modo. Tomaban masas iguales a y b de un mismo líquido elevados á diferentes temperaturas, y mezclándolas rápidamente, veían si la temperatura definitiva del sistema era media aritmética entre las de las dos masas. En efecto, debe ser asi en el supuesto de proporcionalidad que examinamos; y la esperiencia manifiesta que el resultado se acerca tanto mas á ella cuanto mas cuidado se ha puesto para evitar las pérdidas de calor al formarse la mezcla y en la valuacion de su temperatura.

Este método se ha usado tambien frecuentemente para medir calores específicos ó para evaluar temperaturas á que no pueden llegar los termómetros ordinarios. Entonces se supone siempre constante el coeficiente c en cada uno de los cuerpos de la mezcla á todas las temperaturas á que se les puede poner, y se trata de deducir la influencia que ha debido egercer á la temperatura media. Supongamos que habiendo calentado un kilogramo de vidrio comun hasta 86° centesimales, se le mete en 10 kilógramos de agua á la temperatura del hielo al derretirse, y que esta agua sube á 1°,470; resultará de aqui suponiendo constantes los calores específicos, que el mismo desprendimiento de calor hubiera elevado un solo kilógramo de agua de 0 á 14°,70. Ahora bien, esta elevacion corresponde á un descenso de 86° — 1°,470, ó 84°,53 en la temperatura de una masa de vidrio, igualmente de un kilógramo, y asi el calor específico del vidrio sumergido deberá ser $\frac{14,70}{84,54}$ ó 0,1739, siendo 1 el del agua.

Recíprocamente si por medio de otras esperien-

cias se conociese la relacion 0,1739 de los colores específicos se podria por un cálculo inverso volver á la temperatura del vidro. En este caso despues de haber reducido como antes la elevacion de temperatura 1°,470 al caso de la igualdad de masa, lo cual la muda en 14°,7, no habria mas que dividir este número por el calor específico del cuerpo sumergido que era 0,1739, y el cuociente 84°,53 espresará en general el número de grados que habrá bajado la temperatura de este cuerpo por la inmersion. Añadiéndole pues la temperatura definitiva del sistema 1°,47, se tendrá su temperatura inicial, que será 86°. Hemos supuesto que la temperatura del agua antes de la inmersion era 0°, pero igualmente se podrá hacer con cualquiera otra temperatura, pues el cálculo seria el mismo; solo que en la operacion habria que contar todas las indicaciones termométricas desde esta temperatura, y reducirlas despues á 0° como es costumbre.

De este modo ha determinado Coulomb en sus esperiencias sobre el magnetismo las temperaturas del temple que daba á sus barras, y de De Laroche empleaba el mismo método en sus esperiencias sobre el calórico radiante, para determinar las de los pedazos de cobre que colocaba en el foco de sus espejos.

Sin embargo, este método para ser exacto exige dos precauciones indispensables. Como el líquido en que se hace la inmersion se contiene siempre en un vaso, es preciso contar con la parte de calórico que la sustancia del vaso quita ó comunica á la mezcla, como tambien con el enfriamiento ó calentamiento progresivo que sufre la mezcla por irradiacion entre el instante en que se efectúa la inmersion y el que se mide la temperatura comun. Siempre debe tratarse de que sean lo menor que se pueda, lo cual se consigue empleando vasos que tengan muy poca masa, y haciendo las mezclas con mucha rapidez. Tambien es preciso cuidar de medir las

temperaturas de los líquidos antes y despues de la inmersion con termómetros, cuyo depósito cilíndrico ocupe toda la altura del vaso, á fin de obtener una temperatura media entre las temperaturas de todas las capas, las cuales son siempre diferentes.

Despues de tomadas todas estas precauciones, si se comparan las ventajas é inconvenientes de este método con los que presenta el calorímetro de hielo, aparecerá preferible este instrumento por su exactitud, aunque su uso sea un poco dificil. Ademas es susceptible de otras muchas aplicaciones que no pueden hacerse con el método de las mezclas.

Se sabe, por ejemplo, que un gran número de sustancias al combinarse entre sí desprenden calor. ¿Se quiere medir en cuanta cantidad? No hay mas que enfriar separadamente estas sustancias hasta 0°, hacer su combinacion en el calorímetro, y dejar enfriarse todo el sistema otra vez hasta 0°. La cantidad de hielo derretido será la medida de la que se haya desprendido de calórico.

Por el contrario, si absorven calor estas sustancias al combinarse, es necesario elevarlas separadamente á una temperatura comun bastante elevada, para que aun despues de su combinacion se hallen mas calientes que el hielo. Hecho esto se mezcla en el interior del calorímetro y se mide la cantidad de hielo que ha fundido la combinacion al enfriarse hasta 0°. Se mide tambien, aparte, el calor específico de la combinacion ya formada observando el número de kilógramos de hielo que puede derretir al enfriarse un número conocido de grados, de donde se deducirá proporcionalmente el número de kilógramos que hubiera debido derretir desde el punto en que se hallaban los principios constituyentes, en el momento de introducirlos separadamente en en el calorímetro. Restando entonces este resultado de la cantidad total de hielo derretido en la primera esperiencia por los efectos reunidos del enfriamiento y del calor absorvido ó desprendido, el res-

to será el número de kilogramos que habrá derretido el acto de la combinacion ó el de los que haya impedido derretir. De este modo pueden valuarse las cantidades de calórico que abandonan los cuerpos al pasar del estado fluido al sólido; á lo menos respecto á los que se hielan sobre la temperatura del calorimetro, es decir, sobre 0°. En fin, el calorimetro puede servir para determinar las cantidades de calórico desprendidas en la combustion y en la respiracion; pues para ello no hay mas que quemar cuerpos ó hacer respirar animales en el calorímetro y medir las cantidades de hielo derretido.

Este importante fenómeno de la separacion y absorcion de calórico por los cuerpos en el momento de mudar de estado, fue observado la primera vez por Black hácia el año de 1760. He conducido á este gran descubrimiento por la observacion de la lentitud con que se derriten la nieve y el hielo, sin cambiar de temperatura, en una atmósfera en que se calientan rápidamente masas iguales de agua líquida, primitivamente tan frias como el hielo ó la nieve. En efecto, puesto que las cantidades de calor comunicadas cada momento por el medio circundante son las mismas en ambos casos á igual temperatura, es preciso que las que entran en la nieve ó el hielo, se empleen en derretirlos, pues su temperatura medida por el termómetro permanece fija hasta que se funde enteramente. Black trató de medir esta cantidad de calor absorvido, por la comparacion de las velocidades del calentamiento del agua y de la nieve; pero consiguió el mismo objeto por un método infinitamente mas exacto; por el método de las mezclas que imaginó y en la que tuvo cuenta con la cantidad de calórico que absorvian los vasos, la cual le condujo necesariamente á descubrir la desigualdad de los calores específicos de diferentes sustancias. Debe, pues, considerársele con justo motivo, como el creador de este nuevo ramo de física, tan hermoso en sí mismo y tan útil por

sus aplicaciones en las artes.

Black en una de sus esperiencias halló que 143 partes de agua líquida, en peso, á la temperatura de 87°,777 del termómetro centesimal, mezcladas con 119 de hielo á 0°, producian 262 partes de agua líquida, á 11°,666. Esto equivale á 262.11$\frac{2}{3}$ ó 3056$\frac{2}{3}$ de agua líquida elevada á la temperatura de 1°; luego el agua empleada, equivale á 143.87.777 ó 12552$\frac{2}{3}$ elevada á 1°. La diferencia 9495,556 ha sido, pues, absorvida por la 119 partes de hielo, lo cual da 79,79 partes de agua á 1°, ó 1 parte de agua á 79,79 por cada parte de hielo derretido. Por una serie de esperiencias de este género estableció Black que una masa de agua líquida al enfriarse desde 80° centésima hasta 0, derrite un peso igual á ella de hielo á 0°. Segun los Sres. Lavoisier y Laplace, un enfriamiento de 75° basta para producir este efecto; y la diferencia no es muy considerable.

Black midió asi por medio de mezclas las cantidades de calórico absorvidas y hechas latentes en la fusion de diferentes cuerpos; y las llamó *calórico de fluidez*, porque completan la suma total del calórico necesaria para la existencia de cada cuerpo en el estado líquido. Espresólas en funcion del número de grados á que podian elevar la temperatura de una masa de agua de un peso igual al del cuerpo. De este modo halló los resultados siguientes, á que yo he unido la evaluacion de los Sres. Lavoisier y Laplace relativamente al agua.

Denominacion de las sustancias.	Temperatura centesimal á que se funden.	Calórico de fluidez.
Agua.	0	75,°000
Esperma de ballena.	56	82, 222
Cera de abejas. . . .	60	97, 220
Estaño.	216	277, 777

Se ve que la cantidad de calórico absorvido parece que aumenta á medida que se eleva el grado de fusion.

Si se quisiesen enunciar estas cantidades de calórico conforme á nuestras convenciones anteriores, es decir, en kilógramos de hielo derretido, nos seria sumamente facil; porque suponiendo iguales por el cálculo las masas empleadas de agua y de cada sustancia, si se llama c el calor específico del agua, y t la temperatura señalada en la última columna, ct será la cantidad de hielo que derretiria el calórico de fluidez absorvido por una masa igual á 1. Si se efectúa este cálculo substituyendo en vez de c el valor $\frac{1}{75}$ hallado por los Sres. Lavoisier y Laplace respecto á la division centesimal, el agua dará 1 por resultado; la esperma de ballena dará $\frac{1}{75}$ 82,222 ó 1,0963; y del mismo modo se hallará para la cera 1,2963 y para el estaño 3,7037, que son respectivamente los kilógranos de hielo que hubieran podido derretirse por el calórico de fluidez propio de cada kilógramo de estas sustancias.

Black reconoció igualmente que los cuerpo líquidos absorven calórico al convertirse en gases, y le restituyen enteramente al volver del estado gaseoso al líquido. Hizo evidente este fenómeno por medio de esperiencias incontestables; y aun quiso medir la cantidad absoluta de calórico desprendido en la conversion del vapor acuoso en agua; pero no teniendo una completa seguridad en los métodos

que habia empleado, rogó á su su discípulo Mr. Watt que volviese á hacer la esperiencia. Este, á quien era muy importante este punto para la teoría de sus máquinas de vapor, puso en él el mayor cuidado; y halló que el calórico desprendido por el vapor al liquidarse podia elevar una masa igual de agua á la temperatura de 950° de Fareuheit, ó lo que es lo mismo, podia hacer subir un grado de Fareuheit á una masa de agua 950 veces mayor.

Rumford ha llegado á obtener resultados casi semejantes por un método muy ingenioso, y que nos es tanto mas preciso hacer conocer cuanto que se aplica tambien muy exacta y fácilmente á la medida de las cantidades de calórico desprendidas en la combustion. En vez de calorímetro emplea un vaso metálico lleno de agua á una temperatura conocida. Este vaso, formado de hojas muy delgadas de cobre rojo, tiene 8 pulgadas de largo, $4\frac{1}{2}$ de ancho, y $4\frac{3}{4}$ de alto, fig. 8. Su interior contiene una serpentina de la misma materia, que da tres vueltas horizontales, y que está destinado á recibir los productos gasosos que deben calentar el agua. Esta serpentina tiene la forma de un tubo aplanado, cuya altura ó grueso es por todas partes $\frac{1}{2}$ pulgada, y su ancho á la entrada $1\frac{1}{2}$ pulgada, y 1 á la salida. Su boca es un tubo cicular de una pulgada de diámetro y otra de altura, por donde entran los productos, y se eleva verticalmente por dentro del mismo serpentin hasta la altura de $\frac{1}{4}$ de pulgada sobre su fondo. El otro estremo de la serpentina sale verticalmente junto á la pared del vaso opuesta á aquella por donde entran los productos. Un termómetro de depósito cilíndrico, de igual altura que el vaso, indica á cada momento la temperatura media de toda el agua contenida en él. En fin, todo el aparato está sostenido en cuatro pies delgados de madera bien seca.

Ahora bien, es claro que si se queman cualesquiera sustancias debajo de la boca de la serpenti-

na, los productos gasosos que resulten, y el aire que se caliente por su contacto, se elevará dentro del aparato; y dejando en él el esceso de su temperatura sobre la del agua que los rodea, harán subir la de esta cierto número de grados. Para que la operacion sea exacta, es preciso que sean completas las combustiones, lo cual se conocerá en que la sustancia quemada deberá consumirse enteramente con una llama hermosa, y sin producir humo ni olor sensible. Si se emplean bujías para esta operacion, es necesario pesarlas antes de empezar y despues, y tener mucho cuidado en colocar la llama y el pávilo de modo que no produzcan humo. Si son maderas, se reducirán á virutas muy delgadas de cinco á seis líneas de ancho, que se encenderán bajo la misma boca de la serpentina, teniéndolas en la mano ó con unas tenacillas, y asi arderán con la mayor facilidad. En cuanto á la combustion de los licores espirituosos, tales como el alcool y el éter, es necesario para que sea perfecta emplear precauciones particulares de que hablaremos despues.

Pero no basta esto para poder evaluar todo el calor desprendido; es preciso conocer la temperatura á que salen estos productos, despues de haber recorrido todas las vueltas de la serpentina. Para saberlo, ha hecho Rumford comunicar la salida de esta con la boca de otro aparato semejante, y ha hallado que limitándose á producir en el primer aparato cambios poco considerables de temperatura, como exije el método que vamos á describir, el agua del segundo vaso no se calentaba sensiblemente. De aqui ha inferido que entre estos límites es inútil el uso del segundo, y ha dejado de emplearle.

Este método es evidentemente el mismo de las mezclas perfeccionado. Exije, pues, que se tenga cuenta con las cantidades de calórico absorvidas por la serpentina y por las paredes del vaso. Esto puede hacerse, ya por esperiencias directas, exami-

nando cuanto se enfria ó calienta una masa dada de agua; cuando se la introduce en el aparato, ó ya por medio del cálculo, partiendo del peso y el calor específico de las hojas de cobre de que está hecho. Despues de haber hecho Rumford esta correccion en su aparato, halló que su masa y la del agua que contenia equivalian á 7821 gramos de agua, y ha empleado constantemente este número en sus resultados.

Pero hemos visto que igualmente es necesario evitar ó corregir otra causa de error, que es el calentamiento ó enfriamiento progresivo del aparato, tanto por irradiacion como por contacto con la atmósfera circundante. Esto lo ha remediado Rumford de un modo tan seguro como ingenioso. Pone primeramente su aparato á una temperatura cinco ó seis grados inferior á la de la atmósfera, y empieza introduciendo en él los productos que quiere examinar. Estos se enfrian en la serpentina, y la comunican calor, que reparte con el agua por donde pasan sus vueltas. Mientras esta agua no llega á la temperatura del aire esterior, recibe de los cuerpos que la rodean mas calórico que el que les comunica, y por consiguiente se calienta. Pero cuando ha pasado de aquella temperatura se verifica lo contrario, pues entonces envia mas calórico que el que recibe en igual tiempo, y calienta á los cuerpos que la rodean. Luego si se supone la operacion hecha de modo que pase igual tiempo en uno y otro de estos estados, habrá una compensacion en los cambios, y la cantidad de calórico retenida por el aparato será exactamente la misma que si nada hubiera recibido ni comunicado. Asi es como ha procedido Rumford, y el buen éxito de sus esperiencias se debe sin duda en gran parte á esta ingeniosa precaucion.

Para aplicar esto á la condensacion del vapor acuoso, Rumford hizo hervir una cantidad conocida de agua, en un matraz de cuello largo, que se

encorvaba bajo la boca de la serpentina. El estremo de este cuello comunicaba con aquella por medio de un tapon de corcho muy ajustado, que en su parte superior tenia cuatro agujeritos horizontales que se elevaban un poco mas arriba del fondo plano de la serpentina. De este modo, el vapor que se condensaba al salir de los agujeros caía sobre este fondo, y no impedia que saliesen nuevos vapores. El matraz recibia el calor de un hornito portatil colocado á bastante distancia del aparato, y cubierto con varias pantallas. El peso del vapor condensado se sustrajo del del matraz observado antes y despues de la operacion; que generalmente duraba 10 ú 11 minutos. Antes de empezar se hacia siempre hervir el agua en el matraz, para arrojar de ella el aire que podia contener.

De este resultado se deduce por medio de fórmulas que un gramo de vapor acuoso, al condensarse á 100° del termómetro centesimal, desprende una cantidad de calórico 567,195 veces mayor que la que es necesaria para elevar 1° la temperatura de un gramo de agua líquida, ó lo que es lo mismo, que este calórico podrian elevar 1° centesimal la temperatura de 567,195 gramos de agua. Se deja entender que este número no es absoluto, sino que varía segun la escala termométrica que se emplea. De suerte que si se quiere atribuir á otra escala es preciso multiplicarle por el valor de un grado centesimal en funcion de los nuevos grados. Por ejemplo, para espresarle en grados de Farenheit seria necesario multiplicarle por $\frac{180}{100}$ ó por 1, 8, lo cual le convertiría en 1020,951. Asi, la cantidad de calórico desprendida de un gramo de vapor condensado á 212° del termómetro de Farenheit, calentaría un gramo de agua líquida 1021° del mismo termómetro, ó lo que es lo mismo, calentaría 1021 gramos de agua 1° de estos. Para enunciar este resultado al modo de los físicos ingleses, seria necesario decir que el vapor acuoso con-

densado 212° de Farenheit desprende 1021° de calor. Las esperiencias hechas por Mr. Watts en las calderas de las máquinas de vapor dan de 900 á 950, pero el método de Rumford parece que da mayor exactitud. El resultado está aun confirmado por esperiencias de Mr. Gay-Lussac, como tambien por otras de los Sres. Clement y Desormes, cuyo término medio da 550° centésimas en vez de 567 que halló Rumford; de suerte que no puede quedar duda sobre la determinacion de este punto importante.

Si se quisiera saber cuántos gramos de agua á 0° podria hacer hervir esta cantidad de calórico, no habria mas que volver á tomar nuestro primer valor 567,195 gramos, y dividirle por el número de grados centesimales que indica la temperatura del agua hirviendo, es decir, por 100. De este modo se reduciria á 5,67195, que quiere decir que el calórico desprendido de un gramo de agua condensado á 100°, elevaría 5,67195 gramos de agua líquida desde la temperatura del hielo al derretirse, hasta la de la ebulicion del agua.

En fin, si se quisiese enunciar el mismo resultado en gramos de hielo derretido, se multiplicaría el número 567,195 por la fraccion $\frac{1}{75}$, que espresa la cantidad de hielo que puede derretir un gramo de agua líquida al enfriarse un grado centesimal; y el resultado seria 7,5626, que es decir, que el calórico desprendido en la condensacion de un gramo de vapor fundiría 7,5626 gramos de hielo á la temperatura de 0°.

Tambien se puede valuar el calórico desprendido por la combustion por medio del calorímetro de Rumford; y el mismo ha presentado ejemplos. Para esto basta hacer quemar durante algun tiempo, bajo la boca de la serpentina, la sustancia que se quiere esperimentar, pesarla antes y despues de la combustion, y observar el número de grados que la masa quemada ha hecho subir el calorímetro. Por

Si se dividen por 100 los números de esta tabla, se tendrá el número de gramos de agua á 0° que un gramo de cada sustancia podria hacer hervir por su combustion, y si se divide por 75 el número de gramos de hielo á 0° que esta combustion haria derretir.

Para completar los resultados espuestos en este capítulo, nos falta dar á conocer los calores específicos de las sustancias gasosas que se emplean con mas frecuencia. La poca densidad de estas sustancias, y por consiguiente el poco calórico que desprenden al enfriarse, aun un número considerable de grados hacia muy dificil esta determinacion; y asi las tentativas hechas con este objeto por algunos fisicos habian dado resultados muy diferentes. Esta divergencia movió á la primera clase del instituto á proponer por objeto de un premio la investigacion del calor específico de los gases, cuyo premio obtuvieron los señores De Laroche y Berard, por una memoria de la cual aqui nos limitaremos á poner sus resultados.

lo demas deben tomarse las mismas precauciones que en la esperiencia sobre el vapor del agua, y calcular los resultados por las mismas fórmulas.

La tabla siguiente presenta los diversos resultados de combustion obtenidos por Rumford en su aparato, á los cuales he unido los que se deducen de las esperiencias de los Sres. Lavoisier y Laplace. Todos estan indicados en grados del termómetro centesimal, tomando por unidad el valor de c relativo al agua.

Designacion de las sustancias	Elevacion de temperatura que comunicaría á 1 gramo de agua la combustion de 1 gramo.	Observaciones.
Gas hidrógeno.	23400° L. L.	
Aceite de olivas.	11166. L. L.	
	9044. R.	
Cera blanca.	10500. L. L.	
	9479. R.	
Aceite de colza purificado.	9307. R.	
Sebo.	8369. R.	
	7186 L. L.	
Eter sulfúrico.	8030. R.	peso especif. 0,72834 á 20°
Fósforo.	7500. L. L.	
Carbon.	7226. L. L.	
Nafta.	7338. R.	. . . . 0,82731 á 13½°
Alcool de 42°.	6195. R.	. . . . 0,817624 } á 15½
Idem mas acuoso.	5422. R.	. . . . 0,84714 } á 15½
Idem de 33°.	5261. R.	. . . . 0,85325 } á 15½
Madera de encina.	3146. R.	

Los resultados de los señores Lavoisier y Laplace estan señalados con L. L., y los de Rumford con R. Estos son generalmente los mas débiles. ¿Provendrá esto acaso de que el calorimetro de hielo absorve todo el calor, aun el desprendido por irradiacion, sustrayéndose esta parte á la observacion de los demas métodos?

Los señores Clement y Desormes han hallado que las maderas no calientan sino en razon de la cantidad de carbon que contienen, la cual siendo en todos igual á la mitad de su peso, da tambien con corta diferencia la mitad de 7226 o 3600° de calor. Si Rumford halla menos respecto a la madera de encina, tal vez esta diferencia proviene de la pérdida del calor radiante.

Calores específicos de diferentes gases bajo una misma presion, siendo la unidad el del aire atmosférico.

	A igual volumen.	A igual peso.
Aire atmosférico.	1,0000	1,0000
Hidrógeno.	0,9033	12,3401
Acido carbónico.	1,2583	0,8280
Oxígeno.	0,9765	0,8848
Azoe	1,0000	1,0318
Oxide de azoe	1,3503	0,8878
Gas oléfico.	1,5530	1,5763
Oxide de carbono	1,0340	1,0805
Vapor acuoso	1,9600	3,1360

Se ve por esta tabla que el calor específico del gas hidrógeno es á peso igual mucho mayor que el del aire atmosférico, pues la misma cantidad de calórico que elevaria 12°, 3401 la temperatura de una masa de este aire, solo elevaria 1° la de una masa igual de hidrógeno. En general se puede observar que este gas se separa considerablemente de todos los valores que convienen á las otras sustancias gasosas, en cuantas especies de pruebas se les pueden hacer sufrir.

He aqui los mismos resultados con relacion al calor específico del agua, sacados de una esperiencia directa en que De Laroche y Berard han comparado los calentamientos producidos en un calorímetro por masas iguales de agua y de aire atmosférico.

	Calor específico.
Agua.	1,0000
Aire atmosférico	0,2669
Gas hidrógeno	3,2936
Acido carbónico	0,2210
Oxígeno.	0,2361
Azoe.	0,2754
Oxide de azoe	0,2369
Gas oléfico	0,4207
Oxide de carbono	0,2884
Vapor acuoso.	0,8470.

Cada resultado de estos espresa la elevacion de temperatura que cada grano de gas produciria en cada grano de agua líquida al enfriarse 1° centesimal. Dividiéndolos por 75 se tendrá el número de gramos de hielo á 0° que este mismo enfriamiento podria hacer derretir, y dividiéndolos por 100 el número de gramos de agua líquida que podria elevar desde la temperatura del hielo al derretirse hasta la ebulicion.

Por lo demas es preciso tener presente que estos resultudos son la espresion de un fenómeno muy complicado. Por el modo con que se han hecho las esperiencias los gases se contraen al mismo tiempo que se enfrian, puesto que deben siempre equilibrar la misma presion, y asi su densidad al entrar en el calorímetro es menor que al salir de él. El calentamiento que producen en este aparato es, pues, el efecto compuesto del calor que desprenden al enfriarse y contraerse á un mismo tiempo, cuando para obtener resultados simples seria preciso poder observar estos efectos separadamente, y determinar primero la cantidad de calor que se desprende de cada gas al enfriarse, en un espacio dado, y por consiguiente con un volúmen constante, y despues la cantidad que produce al variar de vo-

lúmen, permaneciendo la misma la temperatura esterior. La separacion de estos dos fenómenos parece sumamente difícil: pero es indispensable para obtener resultados simples, y para poner en claro las verdaderas leyes que pueden regir en estos efectos. El mismo inconveniente se halla en las esperiencias sobre el calor específico de los cuerpos líquidos y sólidos, puesto que necesariamente se contraen á medida que se enfrian; pero como es mucho menor la variacion de su volúmen, se supone que es tambien muy débil el desprendimiento de calor que produce, en comparacion al que resulta del descenso de temperatura. Sin embargo, á decir la verdad, nada prueba que sea asi; y aun se podia creer lo contrario al considerar las enormes cantidades de calor que se desprenden de los cuerpos cuando se separan simplemente sus partes unas de otras, como se puede hacer por el frotamiento, la torsion ó el agujeramiento, que no es otra cosa que un frotamiento de suficiente violencia para arrancar unas moléculas de otras. Porque examinando, bajo este punto de vista, el calor específico de las límaduras de bronce que salian al taladrar el alma de un cañon, halló Rumford que tenian sensiblemente el mismo que el bronce, á pesar de haberse separado una enorme cantidad de calor durante su formacion; de donde se debe inferir que este calor existia únicamente entre las moléculas sólidas del bronce, es decir, entre los grupitos de estas partículas que habia separado el intrumento. Si esto es asi, esta cantidad de calor debe variar igualmente siempre que el cuerpo se dilate ó se comprima, y este efecto que se combina con el calor desprendido por la variacion de temperatura, puede muy bien no ser tan débil como se supone comunmente. Mientras estos dos efectos no se hallen separados por la esperiencia, los calores específicos, tales como se observan, serán resultados compuestos; y acaso esta composicion es la que ha impedido hasta ahora des-

cubrir en él ninguna relacion aparente con la naturaleza química de los cuerpos.

Estas consideraciones, evidentes sobre todo respecto á los vapores y los gases, han conducido á Mr. Dulong á buscar métodos que diesen efectos simples; y respecto á los vapores lo han conseguido por medio de un aparato sumamente sencillo.

CAPITULO VI.

De las máquinas de vapor.

Todo el juego de las máquias de vapor está fundado en dos principios; el desenrollo de la fuerza elástica del vapor acuoso por el calor, y su precipitacion súbita por el enfriamiento. La utilidad universal de estas máquinas, y las muchas aplicaciones que ofrecen los principios mas delicados de la teoría del calor, nos imponen la obligacion de hablar aqui de ellas con alguna detencion.

Aunque en mecánica basta en general crear una fuerza ó un motor cualquiera, para poder deducir despues de él toda especie de movimientos, sin embargo, para fijar las ideas supondremos que nuestro objeto los aparta el agua de una mina, por medio de una bomba aspirante TT′, fig. 9, cuyo émbolo P′ es necesario elevar. Para esto, unamos la espiga de este émbolo á una cadena asida al estremo A′ de una palanca arqueada movible al rededor del centro C; es claro que moviendo el brazo opuesto de la palanca otra cadena semejante AD, bastará tirar de esta cadena para elevar el émbolo P′ y hacer subir el agua al cuerpo de bomba por la presion esterior de la atmósfera; y en seguida, cerrándose las válvulas colocadas en la parte inferior, y quedando abandonado el émbolo á sí mismo, bajará por su propio peso, obligará al agua á abrir la válvula colocada en su centro y pasar por ella, y cuando llegue al fondo del cuerpo de bomba aislará en-

teramente esta agua del agua esterior; de suerte, que volviendo á tirar de la cadena AD se elevará esta agua con el émbolo, y al mismo tiempo se introducirá otra en el cuerpo de bomba, volviendo en seguida á bajar el émbolo por su propio peso, y asi sucesivamente. Solo falta, pues, dar movimiento á la cadena AD. Para esto unamos su estremo inferior D á otro émbolo P, que como el primero, se mueva en un cuerpo de bomba TT, igualmente cilíndrico; pero supongamos que la parte inferior de ésta en vez de estar sumergido en el agua, comunica con el recipiente de una máquina neumática; es claro que formando el vacío, la presion de la atmósfera sobre la superficie superior del émbolo P, la hará bajar siempre que sea bastante ancho para que la presion total sobre su superficie esceda al peso del émbolo P′ mas el de la columna de agua que debe levantar. Habiendo asi bajado el émbolo P hasta la parte inferior de su cuerpo de bomba, supongamos que se deja entrar el aire por debajo; entonces la presion de la atmósfera sobre sus dos superficies se contravalanceará por sí misma, y volverá á obrar el mayor peso del émbolo P′, y hará elevar en su tubo á P; y si despues se forma otra vez el vacío debajo de este, se hará que baje P y suba P′ repitiéndose estas alternativas cuantas veces se quiera. Fácilmente se concibe que el uso de una máquina neumática en grande seria una cosa imposible; mas á esto se suple por la introducion del vapor en el cuerpo de bomba TT. Para conseguirlo hay debajo de este una caldera F, fig. 10, llena en parte de agua hirviendo, cuyo vapor igual ó superior en elasticidad al paso de la atmósfera, se puede introducir en el cilindro TT, abriendo la llave R colocada á la parte inferior del tubo de comunicacion F O. Hay tambien en el cuerpo de bomba, á su parte inferior, un canalito V S cerrado con una válvula S, que se abre de dentro á fuera. Esto supuesto, hallándose el émbolo P en lo alto del

cuerpo de bomba, y estando este lleno de aire, ábrase la llave R, y el vapor se introducirá en el cuerpo de bomba, y tanto por su impulso como por su fuerza elástica arrojará parte del aire del cuerpo de bomba, obligándole á levantar la válvula S. En esta operacion se condensa al principio una gran cantidad de vapor por la superficie fria del cilindro y el émbolo, y resulta agua líquida, á la cual se da salida por un tubo EGS′, cuyo estremo inferior está encorbado, y terminado por una válvula S′, que se abre de dentro á fuera. Esta condensacion y esta pérdida de vapor continúan hasta que el émbolo y el cilindro se elevan á la temperatura del vapor; y cuando han llegado á este término, el valor levanta la válvula S, y sale, al principio con lentitud, y muy nebuloso por hallarse mezclado con aire y gotas de agua; pero poco á poco se va haciendo mas fuerte y mas transparente, á medida que va quedando menos aire. Cuando el que dirige la máquina conoce que ha llegado este punto, cierra la llave R, y entonces todo el interior del cuerpo de bomba se halla lleno de vapor puro, que se trata de condensar por medio de un enfriamiento rápido, para que se forme el vacío bajo el émbolo. Esta condensacion se produce introduciendo un chorro de agua fria que se hace bajar de un depósito Z, por el tubo ZR′I, cerrado en R′ con una llave que se llama llave de inyeccion. Abriéndola se inyecta el agua fria en el cuerpo de bomba, precipita en todo ó en parte el vapor que se halla en él, y sale por el tubo EGS′ con el agua que resulta de esta condensacion, y resultando un vacío bajo el émbolo P, le hace bajar la presion de la atmósfera. Se le vuelve á hacer subir introduciendo un chorro de vapor; pues suponiéndose que el agua se mantiene hirviendo en la caldera, el vapor tiene una fuerza elástica á lo menos igual á la del aire; su introduccion bajo el émbolo P basta para compensar la presion de la atmósfera, y el mayor peso del émbolo P′

hace subir á P como en nuestra primera suposicion. Si el vapor estuviese demasiado caliente podria hacer reventar la caldera por su fuerza elástica, y para evitarlo hay en la parte superior de la caldera una válvula de seguridad S″, que se abre de dentro á fuera con una fuerza conocida y determinada. Cuando la fuerza elástica del vapor es igual ó mas débil que la del aire esterior, la válvula permanece cerrada; pero luego que esta fuerza se hace igual á la de la atmósfera, mas la resistencia que opone la válvula, se abre esta, el vapor sale, y no hay que temer ninguna esplosion. A pesar de esto, es necesario que sea fuerte la caldera, porque cuando el vapor pasa al cilindro frio y se condensa en él, el efecto es tan rápido, que el nuevo vapor que se forma no basta para reemplazar instantáneamente al que ha salido. Se verifica, pues, una especie de vacío en la caldera, y no estando balanceada la presion atmosférica, podria reventar, como ha sucedido alguna vez, si no fuese suficientemente sólida.

Segun esto, parece que puesta en movimiento la máquina, no hay ya nunca en el cuerpo de bomba sino vacío ó vapor puro, pero es preciso tener presente que el agua de inyeccion que se introduce contiene tambien aire combinado, que desprende en el cuerpo de bomba, en donde se encuentra casi como en el vacío, y ademas porque se calienta considerablemente por la gran cantidad de calor que se desprende del vapor al liquidarse. Felizmente siendo este aire muy corta cantidad, y hallándose contenido en un espacio muy pequeño, sale fácilmente por la válvula S al primer choque del vapor que se introduce.

La disposicion que acabamos de descubrir no es precisamente la primera que se inventó, pues parece que al principio se pensó solo en emplear como fuerza motriz la elasticidad del vapor; pero la ingeniosa idea de condensar el vapor por el enfriamien-

to para producir el vacío, no pasa del año 1696, y los ingleses la atribuyen al capitan Savary, que la publicó en un tratado que intituló *el Amigo del número*. La aplicacion que hizo de ella era aun muy imperfecta; hasta que en 1705 otro ingles, llamado Newcommen, le dió la disposicion que acabamos de describir, con la cual fue empleada útilmente por mucho tiempo bajo el nombre de *máquina atmosférica*.

Sin embargo, segun los conocimientos de física y de mecánica que tenemos en el dia, es fácil conocer que este aparato tenia muchos defectos. Desde luego era uno grandísimo el tener que emplear un hombre, y un hombre inteligente, para abrir y cerrar á tiempo las llaves de inyeccion y de vapor, cada vez que el émbolo habia concluido su camino. Una buena máquina debe siempre poner por sí misma todas sus piezas en movimiento por la sola accion de su primer motor, sin necesidad de ningun socorro estraño. Ademas, la introduccion del vapor en el cilindro frio era otro grave inconveniente por la gran destruccion de vapor que de aqui resultaba, y que se repetia á cada movimiento, pues el chorro de agua fria que producia la condensacion enfriaba continuamente el cilindro. Pero estos defectos, fáciles de reconocer en el estado actual de la física, no lo eran tanto en aquella época. Al fin los reconoció y corrigió en 1764 Mr. Watt, discípulo y amigo de Black, á quien, hallándose en Glasgow (donde era constructor de instrumentos de matemáticas), encargaron la compostura de un modelito de la máquina de Newcommen, propio de aquella universidad; y en la serie de pruebas que hizo para ponerle corriente observó que gastaba proporcionalmente mas carbon que los grandes aparatos. Deseoso de reconocer la causa de esta diferencia, y queriendo remediar un defecto tan grande, hizo Mr. Watt repetidas esperiencias sobre el mejor modo de construir los cilindros so-

instante precipitará no solo el vapor introducido, sino tambien por la misma causa todo el vapor contenido en el cilindro, el cual solicitado por el vacío que la precipitacion forma en el condensador succesivamente, aunque en un instante casi indivisible, pasa á él y se convierte en agua. Solo falta, pues, estraer esta agua y el aire desprendido, á fin de mantener siempre vacío el condensador, y Mr. Watt empleó para esto una bombita de aire, movida por la misma máquina que obra continuamente sobre el condensador. En fin, la condicion de mantener siempre caliente el cilindrio, no podia convenir con la libre admision del aire atmosférico sobre su superficie superior, que en la máquina de Newcommen era la fuerza que hacia bajar el émbolo, y tanto mas cuanto que para impedir el paso del vapor por entre el cilindro y el émbolo se cubria ordinariamente este con una capa de agua fria que mojaba el interior del cilindro. Mr. Watt concibió la idea feliz y atrevida de suprimir enteramente el uso de la presion atmosférica y hacer mover el émbolo por la fuerza sola del vapor, introduciéndole alternativamente sobre una ú otra de sus superficies, y produciendo el vacío en el mismo instante sobre la superficie opuesta. Encerró, pues, la espiga de su émbolo en una caja de cuero para impedir toda entrada al aire en lo interior del cilindro, y empleando un vapor de una elasticidad igual ó aun un poco superior al peso de la atmósfera, obtuvo alternativamente una fuerza igual ó superior á la del vacío, de abajo arriba y de arriba abajo. Asi, pudo, comunicando este movimiento por medio de varas rígidas, producir una fuerza en cada una de estas direcciones, en vez de que en el aparato de Newcommen el tiempo de la ascension del émbolo era absolutamente perdido, pues simplemente era elevado por el esceso de peso del otro brazo de la gran palanca. Se consiguió, pues, asi economía de tiempo y de dinero, puesto que todos

bre los medios mas á propósito para producir un vacío perfecto sobre el calor á que el agua entraba en ebulicion bajo diferentes presiones, y sobre la cantidad de agua necesaria para producir un volúmen dado de vapor, bajo la presion ordinaria de la atmósfera. Igualmente determinó la cantidad de carbon rigorosamente necesaria para evaporar un peso de agua conocido, y la cantidad de agua fria precisa para precipitar un peso dado de vapor. Conocidos exactamente estos diversos puntos, se le presentaron inmediatamente los defectos del aparato de Newcommen, y pudo señalar la causa de cada uno de ellos. Vió que el vapor no podia condensarse hasta producir un vacío ni aun aproximado, á menos que el cilindro y el agua que contenia tanto de inyeccion como de precipitacion no se enfriasen hasta la temperatura de 37 ó 38° centesimales; y que á una temperatura mas elevada, el vapor subsistente tenia aun una fuerza elástica bastante fuerte para oponer una notable resistencia al peso de la atmósfera. Por otra parte, cuando se queria obtener un grado mas perfecto de vacío, la cantidad de agua de inyeccion necesaria aumentaba en una proporcion muy rápida, de donde resultaba despues una gran destruccion de vapor, cuando se llenaba de nuevo el cilindro. Estas observaciones condujeron á Mr. Watt á inferir que para obtener el vacío mas perfecto posible, con el menor gasto de vapor, era necesario que el cilindro se mantuviese siempre tan caliente como el mismo vapor, y que la inyeccion de agua fria se hiciese en un vaso separado, que llamó *condensador*, y cuya comunicacion con el cilindro se abriese repentinamente en el momento de la inyeccion. En efecto, conforme á lo que sabemos hoy sobre el equilibrio de los vapores, es claro que si el condensador se halla vacío de aire, el vapor del cilindro entrará en él por su propia elasticidad en el momento en que se abra la comunicacion; y una inyeccion de agua fria hecha en el mismo

los movimientos del émbolo eran activos y que no se perdia inútilmente la cantidad de calor empleada para mantenerla caliente mientras su ascension. Mr. Watt cuidó tambien de rodear el cilindro de una cubierta de madera ú otra materia poco conductriz del calórico, en cuyo interior introdujo tambien algunas veces el vapor como medio de calentarle. Hizo tambien mejoras considerables en las diversas piezas del aparato, y llegó á economizar mas de los dos tercios del vapor que exigia la máquina de Newcommen. La de vapor, perfeccionada de este modo, es la que representa la fig. 11, cuya esplicacion se entenderá ahora sin ninguna dificultad.

F D es la caldera en que el agua se convierte en vapor por el calor del horno colocado debajo de ella, la cual algunas veces es de cobre, pero la mayor parte de hierro. Su parte inferior es cóncava, y la llama circula al rededor, y hácia la parte mas alta tiene una válvula de seguridad que se carga mas ó menos segun el grado de fuerza elástica que se quiere obtener. Para que la marcha de la evaporacion sea constante, es necesario que el agua de la caldera se mantenga siempre á un mismo nivel, y por consiguiente que se ponga nueva agua á medida que va reduciéndose á vapor. Esto se consigue por medio de un tubito *vv* que introduce en la caldera el agua de un depósito *z* lleno del agua, ya caliente, que se estrae del condensador por medio de la bomba *tt*. Pero para que solo se verifique esta introduccion en la caldera cuando sea necesaria, el orificio superior del tubo *vv* está cerrado por un tapon que sube ó baja por medio de la palanquita *ab*, y del brazo de este pende un hilo metálico *bm* tirado hácia abajo por un peso *m*, colocado en la caldera de modo que se halle precisamente en la superficie del agua. Si esta baja de su nivel, el peso *m* baja con ella, la palanca *ab* gira, y levantando el tapon deja entrar el agua en la caldera,

pero al momento que se restablece el nivel, vuelve á situarse horizontalmente la palanca *ab*, y coloca el tapon en su lugar. Desde la parte superior de la caldera sale el tubo VV que coloca el vapor á la parte alta del cilindro por la válvula S, y á la baja por S′. El tubo de comunicacion que va de S á S′, está cortado en la fig. 11 para dejar ver otras dos válvulas S_1 S_1', de que hablaremos al momento, pero se le ve entero y de perfil en la figura 12. Las válbulas S_1 S_1' sirven para poner en comunicacion el cilindro con el condensador, por una y otra parte del émbolo, y se abren ó cierran en los momentos oportunos por medio de dos clavijas 1, 2 unidas á la espiga *tt* de la bomba empleada para vaciar el condensador C. Este movimiento se verifica un poco antes que el émbolo haya concluido su camino, en cuyo caso se establece la comunicacion entre las dos superficies á fin de que la igualdad de presion que resulta á la fuerza que se haria á un solo lado, y prevenga de este modo el choque rudo que resultaria si el émbolo corriese hasta el fondo del cilindro. He aqui las principales condiciones relativas al fuego del vapor; pero hay aun otras relativas al modo de hacerle obrar. En efecto, la sola inspeccion de la figura manifiesta que siendo inflexibles las espigas del émbolo grande y de la bomba que vacia el condensador, no pueden estar unidas inmediatamente á los brazos de la palanca AB, pues describiendo cada punto de esta un arco de círculo al rededor de su centro de rotacion, separaria de la vertical el punto de union, y esto romperia la máquina. En el aparato de Newcommen, en que solo era activa la bajada del émbolo, su comunicacion con la palanca por medio de una cadena dispuesta sobre un arco de círculo; pero en la máquina actual la rigidez de las espigas exige otro modo de comunicacion. Mr. Watt lo ha conseguido por una reunion particular de varillas movibles unas sobre otras y combinadas de modo que

compensen la falta de verticalidad del movimiento del estremo de la palanca. La figura representa tambien otras varias piezas muy útiles para la buena disposicion de la máquina, tales como volantes para regularizar el movimiento, y ruedas para comunicarle; pero correspondiendo propiamente estos pormenores á la mecánica, debemos pasarlos en silencio para poder indicar otros puntos que corresponden á la física, y no son menos importantes.

El primero de todos es la determinacion de la temperatura á que conviene emplear el vapor. En efecto, cuanto mas caliente está mayor es su fuerza elástica, y por consiguiente mas efecto produce sobre la superficie del émbolo que comprime, hallándose siempre al otro lado el vacío. Pero tambien es preciso consumir mas carbon para producir un vapor mas caliente; de suerte que la utilidad ó perjuicio de la mayor temperatura es un punto que debe disminuirse.

Ya han hallado algunos fabricantes en Francia utilidad en trabajar á temperaturas un poco mas elevadas que 100°, lo cual puede hacerse cargando un poco la válvula de seguridad de la caldera; pero como todas las máquinas actuales estan construidas para trabajar á una presion poco diferente de la de la atmósfera, no se han podido llevar muy allá los ensayos sobre este punto, pues es evidente que para hacerlo seria preciso que estuviesen reforzadas las calderas. En Inglaterra se han hecho pruebas mas estensas, pues se construyen nuevas máquinas inventadas por Mr. Woolf, en las cuales dicen que el vapor se emplea con una fuerza elástica muy superior á la de la atmósfera, y con una gran economía de combustible. Pero ademas hay en estas máquinas una particularidad que parece que debe ser muy ventajosa, y es que el émbolo, en vez de estar inmediatamente en contacto con el vapor acuoso que derrite y disuelve las materias crasas con que se le unta, recibe el movimiento por el

intermedio de una columna de aceite ú otro líquido craso y poco evaporable, sobre el cual obra por presion el vapor. Para esto el cilindro en que se mueve el émbolo está rodeado por otro cilindro mas grueso, con quien comunica y en el que se pone el aceite, que subiendo y bajando sin cesar en el cilindro interior, le mantiene siempre untuoso. Como quiera que sea, la ventaja ó desventaja de las temperaturas elevadas, debe comprobarse muy pronto, pues en este momento se estan construyendo en Cornouailles máquinas que deben emplear el vapor bajo la presion de siete atmósferas. En este caso se hará mas considerable la pérdida de calórico por irradiacion, y probablemente será preciso contar con este dato en la estimacion de los resultados.

Para formarnos una idea de diminucion de producto que resulta de estas diversas circunstancias, recordemos que un gramo de carbon produce al quemarse 7226 grados de calor, segun las esperiencias de los señores Lavoisier y Laplace. Ahora bien, un gramo de agua á 100° para reducirse á vapor absorve 567°, luego un gramo de calor deberia reducir á vapor cerca de 13 gramos de agua; suponiendo que su calor se emplease enteramente, y que el agua estuviese elevada ya á la temperatura de 100°. Pero por un gran número de ensayos hechos con las máquinas mas perfectas, y los hornos mejor construidos, ha hallado Mr. Clement que un kilógramo de carbon de madera no produce mas que seis ó siete kilógramos de vapor, y un kilógramo del mejor carbon de tierra jamás produce arriba de 6, donde se ve que se pierde poco mas ó menos la mitad del calor por la irradiacion, y por la comunicacion de la caldera con los cuerpos que la rodean.

Conociendo la fuerza elástica que obra sobre la superficie del émbolo, es fácil calcular la presion total que resulta de ella; pero en este cálculo es

preciso hacer entrar como dato la tension del vapor que queda sobre la otra superficie por no ser perfecto el vacío. Ordinarimente se compara el trabajo de una máquina al que se obtendria con cierto número de caballos de una fuerza mediana, y se valúa su potencia segun este número. Los señores Watt y Boulton admiten con arreglo á un gran número de esperiencias que un caballo de una fuerza mediana, trabajando ocho horas cada dia, puede elevar en una hora á la altura de un metro un peso de 265530 kilógramos, que hacen poco mas ó menos 265 metros cúbicos de agua. Mr. Smeathon no valúa esta fuerza sino en 190 metros cúbicos de agua, y Mr. Clement solamente en 100. Tomando, pues, por unidad de fuerza un metro cúbico de agua elevado á un metro, diremos, segun el sistema de Mr. Watt, que un caballo produce en cada hora 265 unidades de fuerza. Si una máquina de vapor es capaz de elevar cada hora 2650 metros cúbicos de agua á la altura de un metro, ó lo que es lo mismo, 265 á la altura de 10 metros, ó 26,5 á la altura de 100 metros, diremos que tiene la fuerza de 10 caballos. Asi hay máquinas que tienen la fuerza de 20, de 30 caballos &c. La mas fuerte que se conoce, segun se asegura, existe en las minas de Cornouailles, que produce una fuerza de 1010 caballos, y sirve para estraer por medio de bombas el agua de una mina de 180 metros de profundidad. Es claro que esta fuerza es lo único que hay que calcular, pues en seguida puede aplicarse á elevar agua, á hacer rodar las canillas en las máquinas de hilar, á mover remos, ó á cualquiera otro uso que exija una fuerza activa. La transmision del primer movimiento puede siempre hacerse por métodos que enseña la mecánica, y que no son de nuestro asunto.

CAPITULO VII.

Nociones sobre la meteorologia.

La meteorologia es la aplicacion de la fisica á los fenómenos constantes ó pasageros que se verifican en la masa de la atmósfera, ó en la superficie terrestre, por la accion general de los agentes naturales, tales como el calor, la electricidad, el magnetismo. Se comprende en ella la distribucion desigual del calor sobre la tierra, las leyes de sus variaciones en las diferentes épocas del año, la diminucion de densidad, y el descenso de temperatura de las capas atmosféricas á diversas alturas, los vientos, las nubes, las nieblas, la lluvia, la nieve, el trueno &c., y por mucho tiempo se la han atribuido tambien todas las apariciones luminosas, tales como las coronas ó parelias, el arco iris &c., que hoy esplica la óptica, los cometas reconocidos ya por verdaderos astros, las bolidas ó globos de fuego que se sabe ya que son verdaderos cuerpos sólidos, dotados de un movimiento propio muy rápido, y que algunas veces caen en tierra cuando han consumido su velocidad propia al atravesar la atmósfera. Estos fenómenos se han separado de la meteorologia al paso que se han ido conociendo mejor; pero aun han quedado otros que tal vez no tienen mayor relacion con ella, por ser aun desconocida su causa; tales son las auroras boreales y las relaciones de este fenómeno con la direccion de la aguja magnetizada.

Se ve por esta relacion que la mayor parte de los hechos que corresponden á la meteorologia propiamente dicha, se han esplicado separadamente en diversas partes de esta obra; y por consiguiente bastará recordarlos bajo el punto de vista comun en que los miramos ahora, y dar algunos mas porme-

el punto de donde se parte, de suerte que en las zonas templadas, por ejemplo, segun las observaciones de Saussure, es en invierno de 230 metros por cada grado del temómetro centesimal, y en verano de 160. Hay, pues, una altura en que este enfriamiento progresivo llega al término del hielo: y de aqui la existencia constante de las nieves en las montañas muy elevadas, y la diferente elevacion del punto en que empiezan segun los diferentes climas. La diminucion vertical de la temperatura varía tambien segun las estaciones, la esposicion de los sitios, y aun el estado mas ó menos transparente del cielo, de suerte que al único medio de conocerla con exactitud es observarla directamente. Esta observacion solo es posible en las pequeñas alturas á que el hombre puede elevarse; pero cuando se ha llegado á terminarla en estos límites, se puede calcular, segun las leyes del equilibrio de los gases, la diminucion de densidad de las capas aéreas, y de aqui deducir una fórmula que proporcione el calcular las diferencias de nivel, segun las alturas barométricas y las temperaturas observadas en los dos estremos de una columna de aire.

Hemos visto al hablar del barómetro que varía muy poco en cada sitio entre los trópicos, y siguiendo un periodo diurno regular, mientras sus oscilaciones se hacen cada vez mayores, al paso que se separa del ecuador. Este hecho manifiesta que se verifican variaciones considérables en la presion atmosférica medida por la columna de mercurio; pero no es posible señalar con certeza la causa de estas variaciones.

En los lagos de Ginebra y de Neufchatel, y en general en todos los lagos grandes, se observa un fenómeno que parece que tenga relacion con el anterior; y es, que algunas veces se elevan muchos pies las aguas de estos lagos en ciertos puntos de las orillas, y permanecen por un tiempo mas ó menos considerable de elevacion. Es de creer que este fe-

nores sobre aquellos de que no hemos hecho mencion especial.

Empecemos por los que corresponden al estado general del globo. La distribucion del calor en la superficie de la tierra y debajo de ella á las pequeñas profundidades á que podemos llegar, parece que depende únicamente de la altura media anual del sol sobre el horizonte, es decir, de la latitud de cada sitio. La temperatura de los subterráneos en cada parage es sensiblemente constante; la mas elevada se halla bajo el ecuador, en donde llega hasta 27°, 5 del termómetro centesimal, y va decreciendo hasta los polos en que baja hasta 0°, ó acaso mas.

La temperatura de la atmósfera junto á la superficie de la tierra sufre en cada sitio variaciones mucho mayores, que producen la alternativa de las estaciones. Pero estas oscilaciones periódicas desaparecen á una pequeña profundidad; de suerte, que en cada sitio, la media de todas las temperaturas anuales es generalmente igual á la temperatura de los subterráneos, lo cual proporciona el poder deducir uno de estos resultados del otro. Parece tambien que en cada sitio la media de las temperaturas mas elevadas y mas bajas es tambien la misma que las anteriores; pero á latitud igual, el grado absoluto de la temperatura media varía segun la altura.

Aplicando á la atmósfera las leyes generales del equilibrio de las masas gasosas, manifiestan que la densidad de las capas que la componen deben disminuir á medida que estan mas elevadas. Hemos visto que la ley de esta diminucion depende de la temperatura de las capas, que no puede conocerse sino por medio de la observacion. En el estado mas ordinario de la atmósfera se halla que la temperatura decrece igualmente con la altura en todos los climas, cuando se parte de una misma temperatura inferior; pero la ley de la progresion varía segun

nómeno es el resultado accidental de una diferencia súbita de presion atmosférica en los diversos puntos de la superficie del lago; pero si es esta la causa, debe manifestarse tambien su influencia sobre el barómetro, y hacerle subir desigualmente en las partes del lago en que las aguas se hallan á distinta altura. Mr. Vaucher ha hecho un gran número de observaciones que parece confirman este modo de ver.

En general se concibe que en una masa tan vasta y movible como el aire, las causas mas ligeras de agitacion pueden producir las agitaciones mas grandes y durables. Se ve, pues, que deben resultar frecuentemente efectos semejantes de las pequeñas variaciones locales que sobrevienen en la temperatura, y otros mayores y mas constantes del movimiento anual del sol á una y otra parte del ecuador, asi como la influencia mas ó menos enérgica que ejerce este astro sobre la tierra en las diferentes estaciones. Tales son probablemente las causas ordinarias de las agitaciones, algunas veces durables, que se producen en la atmósfera, y se llaman vientos. La mayor velocidad del viento que se ha observado es de 40 á 50 metros por segundo, y cuando se sostiene con esta furia derriba las casas, arranca los árboles, agita las aguas del mar, escita las tempestades, y recibe el nombre de huracan.

Entre los trópicos se observan vientos regulares que corren de Este á Oeste, y se llaman *vientos alisios*, los cuales son una consecuencia mecánica de la presencia constante del sol sobre las regiones ecuatoriales. Este astro calienta las capas de aire situadas en la zona tórrida, y las dilata á medida que se presenta á su influjo; asi se establece una especie de ecuador de aire mas elevado que el resto de la atmósfera, y cuyas capas superiores, no estando sostenidas lateralmente, deben caer á una y otra parte hácia los polos. En compensacion las capas de

aire frio, situadas junto á la superficie de los hielos polares, deben concurrir hácia el ecuador para reemplazar á las que se han elevado: lo cual debe producir dos corrientes dirigidas en el sentido del meridiano, una superior desde el ecuador hácia cada polo, y otra inferior desde cada polo hácia el ecuador. Ahora bien, las partículas de aire que componen esta última corriente, viniendo de los polos, solo tienen una velocidad de rotacion estremamente pequeña, que es la del paralelo que dejan. En su marcha hácia el ecuador llegan sucesivamente á otros paralelos cuya velocidad de rotacion de Oeste á Este es mucho mayor, y no pueden girar con tanta velocidad como los puntos de estos paralelos: por consiguiente siempre que un navío, un árbol, una montaña, ó cualquiera otro obstáculo situado en estos parages, y que gira con la tierra de Oeste á Este, venga á ponerse en su paso, debe aquella corriente chocar con él en sentido contrario, es decir, por la parte del Este con toda la diferencia de velocidad. Tal es la esplicacion sencilla y natural de los vientos alisios. Es claro que el movimiento anual del sol á una y otra parte del ecuador debe impedir que se dirijan rigorosamente en este plano en todas las épocas del año; y asi se observa que la direccion en que soplan varía como unos cuatro grados á una y otra parte del ecuador. La causa que los produce debe igualmente obrar fuera de los trópicos, y hasta nuestros climas; pero su efecto debe ser mucho mas débil á causa del menor calor del sol, y de la menor diferencia de las velocidades de rotacion. Asi es que se halla generalmente encubierto por las variaciones accidentales. Igualmente se aparece en ciertos mares, aunque colocados bajo los trópicos, á causa de los vientos que escita el calor del sol en las tierras inmediatas. Tales son los vientos locales y regulares llamados *monzones*, que se observan en el mar de la India.

Al estudiar las leyes de la evaporacion hemos visto que un espacio limitado, ya vacío, ya lleno de un gas cualquiera, no puede contener, respecto á cada temperatura, sino una cantidad determinada de agua bajo forma de vapor insensible, y hemos dado métodos para descubrir por las indicaciones del higrómetro qué cantidad se halla en este estado. Pero el agua puede tambien existir en el aire en otro estado, en el cual se hace visible formando las nieblas y las nubes. Entonces, segun las observaciones de De Saussure, parece que se coloca en pequeñas vejiguitas vacias, bastante lijeras para poder flotar libremente en el aire; y en efecto, como ha observado Mr. Laplace, si la cubierta acuosa se halla reducida á una estrema tenuidad, la atraccion capilar que ejerce sobre sí misma en su superficie puede ser infinitamente menor que en el estado ordinario, y por consiguiente, estando menos comprimida tendrá tal vez una densidad mucho menor. Pero es muy difícil concebir qué fuerza puede reunir asi, á veces de repente, en ciertas partes del espacio, aglomeraciones de estas partículas limitadas de un modo tan fijo como lo estan algunas veces las nubes, y como los vientos pueden transportarlas sin desunirlas. Cuando los vapores acuosos, despues de haber tomado esta forma, llegan á acercarse aun mas, y á retirarse en gotas líquidas, caen, y forman la lluvia. Un gran número de observaciones y de inducciones muy plausibles; han hecho creer á Volta que el granizo no es otra cosa que gotas de lluvia, movidas lárgo tiempo á una temperatura bastante baja. entre dos nubes electrizadas en sentido contrario. En general, parece que en un gran número de circunstancias, el desarrollo de la electricidad, acompaña, si no es que produce la precipitacion de los vapores acuosos. Se ignora absolutamente cómo se verifica este desprendimiento: se ha supuesto que no granizaba en invierno y que no tronaba nevando; pero todo el mundo puede haber

tenido ocasiones de ver desmentidá esta generalidad de estas aserciones.

Segun una observacion hecha en Inglaterra, si se esponen á diferentes alturas dos vasos de igual estension, y se mide la cantidad de agua que cae en cada uno durante un tiempo considerable, por ejemplo, durante un año, se halla que el mas elevado es el que menos recibe. Esto parece que indica que las gotas de lluvia engruesan al caer por la precipitacion de los vapores acuosos que hallan á su paso, ó bien que haciendo bajar la temperatura del espacio que atraviesan, obligan á estos vapores á precipitarse con mayor abundancia. Esta esperiencia repetida en el observatorio de París, ha dado el mismo resultado. Una consecuencia necesaria de ella es que en general cae mas lluvia en igual superficie en los valles que en las colinas; y digo en general, porque la esperiencia ha presentado algunas veces resultados opuestos.

La distribucion de la lluvia en las diferentes estaciones del año es variable segun los sitios y climas. La ley de los periodos medios que sigue este fenómeno en cada sitio es muy importante, y debe observarse por los que le habitan, porque puede dar mucha luz para la agricultura.

Algunas veces se observan pedazos de nubes que parece que bajan en forma de émbolo hasta la superficie de la tierra ó del mar. Ordinariamente este fenómeno es producido por una columna de aire que gira sobre sí misma con una velocidad suficiente para levantar como por una rosca de arquimedes agua, y aun cuerpos sólidos. Muchas veces se ven salir relámpagos y truenos del seno de estas columnas; y si llegan á pasar sobre un barco, retuercen sus velas y le hacen dar vueltas sobre sí mismo. Algunos se rompen, y entonces le indican con un diluvio de agua; asi es que los marinos temen mucho estos meteoros, y cuando los perciben desde lejos tratan de romperlos á cañona-

zos. Es muy difícil, por no decir imposible, determinar exactamente por solas las leyes de la mecánica cómo pueden formarse estos terribles turbillones.

Fáltanos dar algunos pormenores sobre un fenómeno que acaso no tiene, como ya hemos dicho, la menor relacion con los anteriores, aunque ordinariamente se le coloca en la meteorología; hablo de las *auroras boreales*. Cuando este meteoro es completo, aparece bajo la forma de un arco luminoso, ó mas bien de un segmento de círculo situado á la parte del polo, del cual emanan por intervalos hacecillos radiantes, que cuando duran bastante para poder observar varios á un mismo tiempo, parecen arcos de círculo que van á concurrir á un mismo punto del cielo. La causa de este fenómeno es enteramente desconocida, y ni aun puede presumirse. Solo parece que tiene alguna relacion directa ó indirecta con el magnetismo del globo; porque generalmente se observa que cuando el fenómeno se verifica, sufre la aguja agitaciones súbitas é irregulares. Ademas, segun una observacion muy curiosa de Mr. Dalton, la parte superior del arco visto de cada sitio parece estar dirigida en el meridiano magnético de aquel sitio; pues ha observado esta conformidad en cuantas auroras boreales ha podido ver un arco completo; y se sabe por observaciones antiguas de Maraldi, que sucedia lo mismo en su tiempo, aunque la direccion del meridiano magnético ha cambiado considerablemente desde aquella época. En fin, una aurora boreal, observada en París el 1.º de Febrero de 1817, ha presentado exactamente á Mr. Arago esta misma conformidad. Según Mr. Dalton, la posicion del punto de concurso de los hacecillos, debe tener tambien una relacion constante con la direccion de las fuerzas magnéticas, pues debe corresponder en cada sitio á la direccion de la resultante de estas fuerzas determinada por la aguja de inclinacion. No ha habido proporcion de observar

en París esta particularidad en la última aurora, porque no se reunieron sus hacecillos. Como quiera que sea, la sola coincidencia de la direccion es muy notable, y como observa muy bien Mr. Arago, es necesario, segun esto, que la aurora boreal sea un fenómeno de posicion, como el arco iris, que cada uno ve el suyo; pues de otro modo siendo diferente la direccion del meridiano magnético en diversos sitios, y no reuniéndose como los meridianos celestes en un punto único, no seria posible que un solo objeto se presentase á cada observador en la direccion de su meridiano magnético. Asi esta particularidad deberá considerarse como una de las condiciones fundamentales, que seria necesario llenar cuando se quiera esplicar la causa física que produce las auroras boreales. Mr. Dalton ha tratado de hacerlo en una obra titulada: *Observaciones meteorológicas*: pero á pesar del talento de este ingenioso físico, parece que aun no se han fijado con bastante cuidado los pormenores de este fenómeno, para poder remontar hasta su causa. Un viaje de seis meses á las regiones polares nos daria acaso todas las nociones que nos faltan sobre un objeto tan interesante.

El polo boreal no es el único que presenta estas apariencias luminosas, pues se observan tambien hácia el polo austral, caminando por el hemisferio opuesto de la tierra. Hay, pues, auroras australes, como auroras boreales, y Cook ha observado muchas veces este fenómeno en sus viajes.

Terminaremos este compendio recomendando una aplicacion importante hecha de las leyes de la geografía de las plantas á la medida de la temperatura media de los sitios. Cada vejetal no puede vivir sino entre ciertos límites determinados de temperatura, y su vejetacion mas ó menos robusta indica la mayor ó menor aproximacion ó distancia á estos límites. El aspecto de los vejetales que subsisten en cada pais presenta, pues, como una especie de termometro vivo que indica al viajero el

TABLA

DE LOS LIBROS Y CAPÍTULOS QUE CONTIENE ESTE TOMO.

termómetro medio de las temperaturas anuales y sus estremos. Pueden verse los principios de esta útil aplicacion en la obra de Mr. de Humboldt, titulada: *De distributione geographica plantarum ;* y Mr. de Buch ha hecho un hermoso uso de ella en su *viage á Laponia.*

FIN DE LA OBRA.

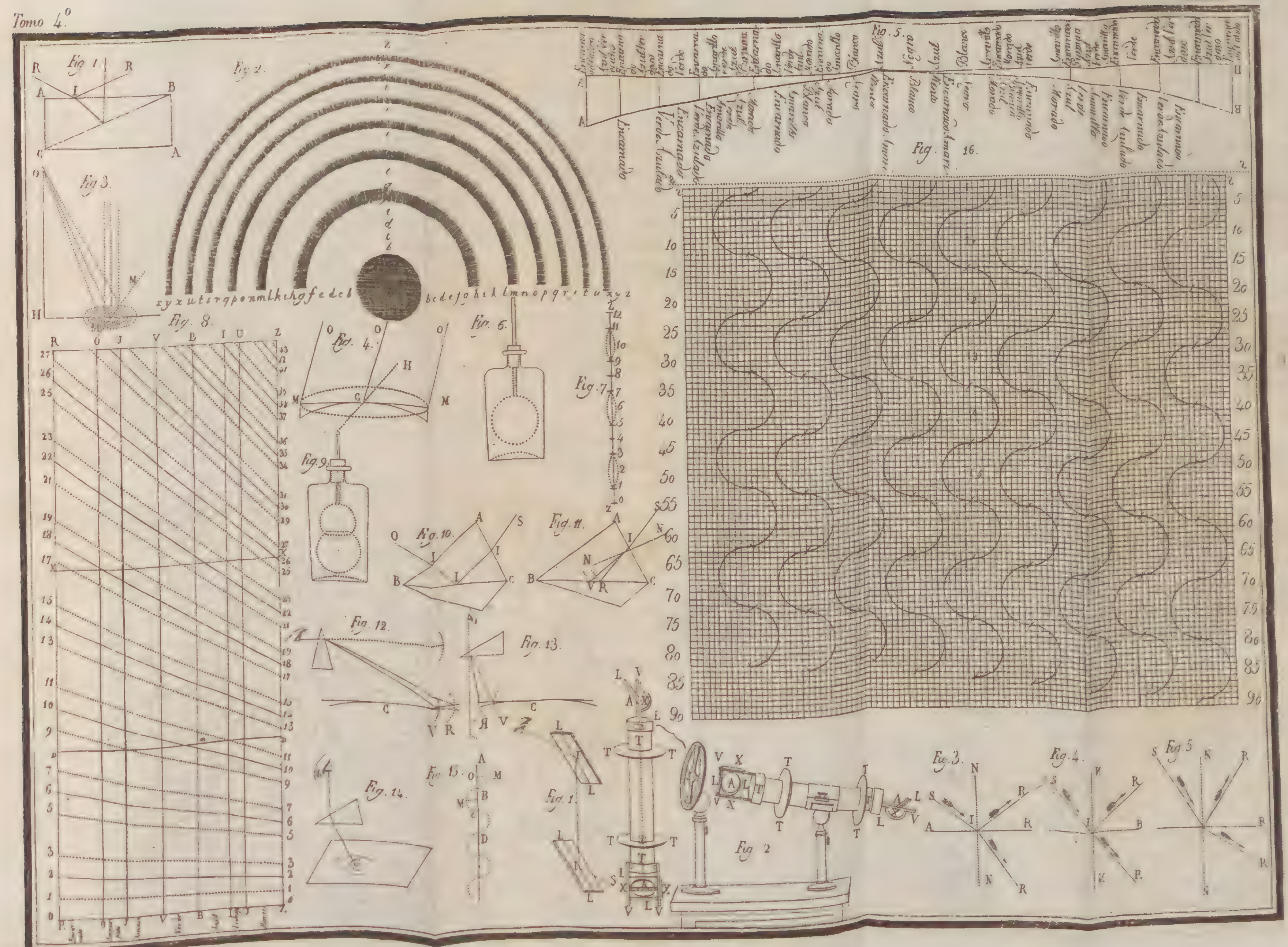

Fig. 1
Fig. 2
Fig. 3
Fig. 4
Fig. 5
Fig. 6
Fig. 7
Fig. 8
Fig. 9
Fig. 10
Fig. 11
Fig. 12
Fig. 13
Fig. 14
Fig. 15
Fig. 16
Encarnado
Blanco
Fig. 3
Fig. 4
Fig. 5
Fig. 2

Fig 6 Fig 7 Fig 8 Fig 9 Fig 10 Fig 11 Fig 12

Fig 13 Fig 14 Fig 15 Fig 16 Fig 17

Fig 18 Fig 19 Fig 20 Fig 24

23 21 19 17 15 13 11 9 7 5 3 0 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21 23

22 20 18 16 14 12 10 8 6 4 0 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22

Fig 21 Fig 25 Fig 26 Fig 27

Morado

Verde

Encarnado

Fig 22 Fig 23

Fig 1

Fig 2

Fig 3

Fig 4

Fig 5

Fig 6

Fig 7

Fig 8

Fig 9

Fig 10

Fig 11

Fig 12




Biblioteca
UNIVERSIDAD DE SEVILLA
600704194
i 25923390



colorchecker CLASSIC

mm

calibrite